



宇宙系列

Out of This World:

Colliding Universes, Branes, Strings, and Other Wild Ideas of Modern Physics

看不见的世界

——碰撞的宇宙，膜，弦及其他

[美] 斯蒂芬·韦伯 / 著 胡俊伟 / 译



第一推动

湖南科学技术出版社

作者介绍：

斯蒂芬·韦伯

斯蒂芬·韦伯为英国开放大学（Open University，通过电视、函授或因特网教学）的学与教计划工作（Learning&Teaching Solutions, LTS）。他的上一部著作是《外星人在哪？》。

（本书中的）这些想法比当代最富盛名的小说更具想象力也更加野心勃勃……（它们）比通常情况下人们能够从物理学这个字眼联想出来的事情美妙得多。现代物理学的研究方式——来自于全世界的学者们通过因特网的帮助共同参与到这一事业中——就像错综复杂却又美妙绝伦的即兴之作一般。

责任编辑：吴 炜 戴 涛
装帧设计：谢 颖

Out of This World by Stephen Webb

Copyright © 2004 Praxis Publishing

Published in the United States by Copenicus Books, an imprint of Springer-Verlag

All Rights Reserved

Springer is a part of Springer Science and Business Media.

湖南科学技术出版社通过德国 Springer 出版社独家获得本书中文简体版中国大陆地区出版发行权。

著作权合同登记号: 18-2006-069

图书在版编目 (CIP) 数据

看不见的世界 / (美) 韦伯著; 胡俊伟译. —长沙: 湖南科学技术出版社, 2007.12

(第一推动丛书·宇宙系列)

书名原文: Out of This World

ISBN 978-7-5357-5111-9

I. 看… II. ①韦…②胡… III. 宇宙学—普及读物
IV. P159-49

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 188848 号

第一推动丛书 宇宙系列

看不见的世界

——碰撞的宇宙，膜，弦及其他

著者: [美] 斯蒂芬·韦伯

译者: 胡俊伟

责任编辑: 吴炜 戴涛

出版发行: 湖南科学技术出版社

社址: 长沙市湘雅路 276 号

<http://www.hnstp.com>

邮购联系: 本社直销科 0731-4375808

印刷: 长沙化勘印刷有限公司

(印装质量问题请直接与本厂联系)

厂址: 长沙市青园路 4 号

邮编: 410004

出版日期: 2007 年 12 月第 1 版第 1 次

开本: 880mm×1230mm 1/32

印张: 14.5

字数: 232000

书号: ISBN 978-7-5357-5111-9

定价: 35.00 元

(版权所有·翻印必究)

总 序

科学，特别是自然科学，最重要的目标之一，就是追寻科学本身的原动力，或曰追寻其第一推动。同时，科学的这种追求精神本身，又成为社会发展和人类进步的一种最基本的推动。

科学总是寻求发现和了解客观世界的新现象，研究和掌握新规律，总是在不懈地追求真理。科学是认真的、严谨的、实事求是的，同时，科学又是创造的。科学的最基本态度之一就是疑问，科学的最基本精神之一就是批判。

的确，科学活动，特别是自然科学活动，比较起其他的人类活动来，其最基本特征就是不断进步。哪怕在其他方面倒退的时候，科学却总是进步着，即使是缓慢而艰难地进步，这表明，自然科学活动中包含着人类的最进步因素。

正是在这个意义上，科学堪称为人类进步的“第一推动”。

科学教育，特别是自然科学的教育，是提高人们素质的重要因素，是现代教育的一个核心。科学教育不仅使人获得生活



和工作所需的知识和技能，更重要的是使人获得科学思想、科学精神、科学态度以及科学方法的熏陶和培养，使人获得非生物本能的智慧，获得非与生俱来的灵魂。可以这样说，没有科学的“教育”，只是培养信仰，而不是教育。没有受过科学教育的人，只能称为受过训练，而非受过教育。

正是在这个意义上，科学堪称为使人进化为现代人的“第一推动”。

近百年来，无数仁人志士意识到，强国富民再造中国离不开科学技术，他们为摆脱愚昧与无知作了艰苦卓绝的奋斗。中国的科学先贤们代代相传，不遗余力地为中国的进步献身于科学启蒙运动，以图完成国人的强国梦。然而应该说，这个目标远未达到。今日的中国需要新的科学启蒙，需要现代科学教育。只有全社会的人具备较高的科学素质，以科学的精神和思想、科学的态度和方法作为探讨和解决各类问题的共同基础和出发点，社会才能更好地向前发展和进步。因此，中国的进步离不开科学，是毋庸置疑的。

正是在这个意义上，似乎可以说，科学已被公认是中国进步所必不可少的推动。

然而，这并不意味着，科学的精神也同样地被公认和接受。虽然，科学已渗透到社会的各个领域和层面，科学的价值和地位也更高了，但是毋庸讳言，在一定的范围内，或某些特定时候，人们只是承认“科学是有用的”，只停留在对科学所带来的后果的接受和承认，而不是对科学的原动力、科学的精神的接受和承认。此种现象的存在也是不能忽视的。

科学的精神之一，是它自身就是自身的“第一推动”。也

就是说，科学活动在原则上是不隶属于服务于神学的，不隶属于服务于儒学的，科学活动在原则上也不隶属于服务于任何哲学。科学是超越宗教差别的，超越民族差别的，超越党派差别的，超越文化的地域的差别的，科学是普适的、独立的，它自身就是自身的主宰。

湖南科学技术出版社精选了一批关于科学思想和科学精神的世界名著，请有关学者译成中文出版，其目的就是为了传播科学的精神，科学的思想，特别是自然科学的精神和思想，从而起到倡导科学精神，推动科技发展，对全民进行新的科学启蒙和科学教育的作用，为中国的进步作一点推动。丛书定名为《第一推动》，当然并非说其中每一册都是第一推动，但是可以肯定，蕴含在每一册中的科学的内容、观点、思想和精神，都会使你或多或少地更接近第一推动，或多或少地发现，自身如何成为自身的主宰。

《第一推动丛书》编委会

前 言

本书试图与非数学专业读者分享现代理论物理学中最具吸引力、最激动人心的一些想法。我也非常乐意借此机会向那些独一无二的天才们表达感激之情。不过，在此我无意写一部有关这些想法的科学史；对于那些我略掉了其重要贡献的物理学家们，我表示诚挚的歉意。

很多人对这本书的诞生提供了重要的帮助，我在这里向他们表示感谢。Praxis 出版社的 Clive Horwood 和哥白尼书局的 Paul Farrell 都是本书的支持者。作为一位不可替代的编辑，Anna Painter 为本书提出了很多无价的建议。John Mason 博士与 Lyman Lyons 对本书的最早版本提出了建设性的批评意见。仍然存在于书中的各种谬误——在没有数学辅助的情况下解释理论物理中最奇妙的思想时难以避免的种种曲解与错误——都是我一个人的责任。

我必须要感谢 Ron, Ronnie, Peter, Jackie, Emiy 以及



FIRST MOVER 第一推动

Abigail 的大力協助。最重要的是，我必須要感謝 Heike 以及 Jessica 的耐心。

斯蒂芬·韦伯

2004 年 4 月于米尔顿凯恩斯

[illegible]

目 录

> 前言	1
> 导言	1
理想物理	3
洞穴寓言	6
寻找对称性	10
> 第一章 对称性	14
日常生活中的对称性	17
雪花	23
物理学中的对称性	26
群论：对称性的数学	39
> 第二章 物理学的两大支柱	45
全球卫星定位系统	47
大尺度物理：广义相对论	53
小尺度物理：量子的神秘世界	59



FIRST MOVER

第一推动

广义相对论遭遇量子力学：小尺度上的大麻烦	69
> 第三章 构建宇宙的基块	73
基本粒子的产生	74
为基本粒子分类	86
初探基本粒子	94
> 第四章 标准模型	113
我们最好的理论	114
局域规范对称性	119
电磁相互作用	121
强相互作用	127
弱相互作用	136
电弱统一与希格斯粒子	142
标准模型的成功	153
标准模型并非终极理论	157
> 第五章 大统一理论与超对称	162
大统一理论	163
超对称	182
局域超对称	192
> 第六章 更高的维度	200
卡鲁扎-克莱因理论	201
然而更多的维度	212
> 第七章 超弦	217
超弦的早期历史	221
第一次超弦革命	234
硕果累累的革命	239

> 第八章 M 的故事	255
电磁对偶性	257
弦论中的对偶性	275
M 理论	283
结论	289
> 第九章 关于膜与黑洞	292
膜	293
D-膜	299
黑洞	303
> 第十章 我们的世界是一幅全息图	318
熵	319
全息原理	327
AdS/CFT 对应	332
将弦捆在一起: AdS/CFT 与大 N	340
> 第十一章 当世界碰撞时	344
膜的新世界	346
探索更高的维度	361
为什么两个膜比一个更好: 兰德尔-山德拉姆方案	379
时空真的是对称的吗?	387
火宇宙: 当世界碰撞时	392
人存原理	400
即将到来的吸引力	401
> 小辞典	406
> 索引	423
> 参考书目	433
> 图片使用授权声明	436
> 译后记	439

世界的真实对我来说不过是一场虚幻，
梦想之地的狂乱思想并没有变成日常生活的素材，
而是成了彻彻底底本身实在。

埃德加·爱伦·坡 (Edgar Allan Poe)，
《贝瑞尼斯》(Berenice)

本书讲述了一些真正的狂野思想；一群冷静、专业、极端聪明的人为什么会认为这样的一些思想竟可能是真实的呢？本书将一一道来。

这些疯狂的思想深深地植根于粒子物理学——一门追求简单性、秩序，寻找这个宇宙最基本组成的科学。不断向前的研究正带着物理学家们向从未到过的更高能量与更小尺度前进；大爆炸最初几分钟的情况也进入了物理学家们的思考范围。探寻宇宙的构造也将同时回答我们的宇宙何时且怎样起源，它的命运可能如何这样一些问题。在这些思想中，简单性与深刻性



有趣地混成一体。

所有这些基本想法比当代最负盛名的小说更具想象力也更加野心勃勃。套用一句久负盛名的作家比尔·布莱森 (Bill Bryson) 的话, “如果那样一些想法出自公园长凳上的一个陌生人之口, 那你肯定会鄙夷又小心翼翼地闪到一边去。”同时, 那些想法比通常情况下人们能够从物理学这个字眼联想出来的事情美妙得多。推动粒子物理学不断向前发展的一个重要驱动力就是发现方程中的对称性——或者说, 美。而且, 现代物理学的研究方式——来自于全世界的学者们通过因特网的帮助共同参与到这一事业中——就像错综复杂却又美妙绝伦的即席之作一般。这些奇妙的物理学思想——充满想象力, 内涵丰富又美妙十足的思想——对人类精神世界的贡献就如同艺术、音乐、文学的贡献一般。不过还有一个关键的区别。我们不久就可以用实验检验这些奇妙的想法正确与否。几年之内, 我们就可以知道这些想法中哪些是正确的, 哪些只是纯粹的想象。很明显, 这些想法中的大部分将是错误的——科学实践中的各种猜想命运大抵如此。不过我们也将证实其中的一些, 我们关于这个世界的认识将由于这些得到证实的想法而永远地改变。

在本书的最后一章中, 我们将探讨一些未来可能的实验, 这些实验将找寻隐藏的维度、膜、碰撞的宇宙等一些现代物理学思想。目前, 我们还没法做这样的实验。因此, 理论物理学家们只能利用另一种实验——理想实验——来研究他们的想法, 理想实验在我们的讨论中将占有很重要的分量。那么我们首先来定义“理想”。

理想物理

在头脑中思考物理就是理想物理。

刘易斯·C·爱泼斯坦 (Lewis C. Epstein)

理想实验就是在头脑中想象的实验，而不是在真实的实验室中进行的实验。对于那些由于不实际或者不合乎道德规范而不能“真正”实验的题目来说，这种理想实验再好不过了。理想实验在科学中无处不在。比方说，在认知科学中，哲学家们或许会争论有关先天认知困难的人（zombie）的问题：假如所有的正常人类都是有一定认知问题的人——外貌举止都像我们了解热爱的那些人，只不过缺乏认知经验，大脑中混沌一片。那么在他们眼中，这个世界看起来会是什么样子呢？对于这样的问题的研究，有可能为我们带来意识本质的一些启示。再比如量子力学中，物理学家们有一个很著名的佯谬——薛定谔的猫。这个佯谬讨论的是一只可怜的小家伙，由于量子力学的态叠加原理，它可能同时处于死亡或者生存的状态中。对于这只小猫命运的认识可以帮助我们弄清迷雾重重的量子概率究竟如何变成了我们能观测到的确定量子态。在所有的科学家中，理论物理学家无疑最为钟爱理想实验，而在所有的理论物理学家中，爱因斯坦无疑是理想实验最伟大的代言人。

爱因斯坦年轻的时候，曾经问过自己这样的问题：假如自己以光速运动，那么自己眼中的光是什么样子呢？当时还很年轻的爱因斯坦显然无法自己做实验来检验这一想法；于是，他



3 转而求助于对称原理、逻辑、数学自洽性等。他的论证也必须与所有其他的物理定律不相矛盾。经过十年的思考，爱因斯坦找到了答案。他的推理指引他发现了现代物理学的里程碑之一——狭义相对论。爱因斯坦还分析过另一个理想实验，这次成果更加丰厚。这个理想实验提出的问题是：困在狭小、空荡、封闭的箱子中的观测者能否弄清在他所感受到的力中，多少来自于引力，多少又来自加速度。正是对这个问题的分析，使得爱因斯坦提出了广义相对论——而广义相对论或许是现代物理学中最美丽的理论。

理论不断发展提出了越来越复杂的理想实验，理论物理学家们创造了一些博大精深同时又成就斐然的基本理论。事实上，这些理论的范围太过广泛了，以至于有些作者认为物理学家们即将写出“万物之理”（theory of everything）。本书不采用万物之理这种措辞，因为在我看来这个名称并不恰当：不论粒子物理的终极统一理论是什么，它都不能算是万物之理。我们举例来说明这一点。基本的物理理论至少不能解释人类意识问题。但我会常常使用“基本理论”与“基本物理”这样的术语。这些术语有其特殊含义，我们有必要细致地讨论一下其含义。

诺贝尔奖获得者史蒂文·温伯格（Steven Weinberg）曾写过一篇美妙的短文《关于粉笔屑》[题目取自 19 世纪 60 年代托马斯·赫胥黎（Thomas Huxley）的同名著名演讲]。在这篇短文中，温伯格指出：无论什么时候，只要我们问有关科学问题的“为什么”，我们想要的都是用最简单最经济的术语表述的答案。我们不停地问着为什么，解释的箭头最终将把我

们带到粒子物理范畴。不信我们来看一个例子：为什么粉笔是白色的？好的，我们就用粉笔的光吸收性质来解释就行。那么粉笔为什么会有特殊的光吸收性质呢？嗯，这个问题与组成粉笔的分子情况有关。我们就这样不停追问着为什么，解释的箭头最终将把我们引向粒子物理（然后再到粒子物理未解决的前沿问题）。关键在于，不管我们从什么问题开始提问，最后解释的箭头都会将我们引到粒子物理。（另一位诺贝尔奖获得者，理查德·费曼也曾经在一次有趣的电视访谈中谈到类似的内容。他要求电视观众们按下面这样的思路想象一段对话。“奈丽姑姑住院了。”“她怎么了？”“她在冰上滑倒摔断了腿。”她为什么会滑倒？“要是你对冰施加一些压力，冰就会融化，而奈丽姑姑那时走在薄薄的冰层上。当时冰的摩擦力很小，所以她就滑倒了。”为什么你施加压力的话冰就会融化？“这个问题很有意思！大部分的物质并不这样，要解释这个问题我们必须要用到量子力学。”为什么她是倒下去，而不是立起来？“这的确是一个很有深度的问题……”最终，如果我们不断地这样问着“为什么”，我们就会被带到粒子物理以及粒子物理尚未解决的问题面前。）

每一个解释之箭终将指向同一源头。无论我们一开始要问的是是什么，只要我们不停地问“为什么”，我们最终就一定要讨论宇宙的基石以及这些基石究竟是如何相互作用的。在这层意义上，粒子物理学是科学真正的基础。但这并不是说粒子物理学比其他的科学——比如化学——更加重要，更加有意义。不过我们的确可以指望一个化学问题最终用基本物理学来回答；相反，我们不能指望一个物理问题最终可以用化学回答。



比如，“为什么化学元素周期表具有某种规律性？”这个问题我们可以用物理学回答；但是，“为什么宇宙会加速膨胀？”这个问题却不能用化学来回答。

最后，不停地问“为什么”——并不会把我们带到“万物之理”面前；我们最终得到的将是一个关于空间、时间、物质的基本组成以及其中的基本相互作用的普适的统一理论。到那时，我们就会在一个我们从未触及的深层次上理解我们的这个宇宙。

在本书的后面，我们将讨论各式各样的理想实验。其中最著名的一个已经有两千年历史了。虽然我们即将要讨论的这个理想实验是由两千年以前的哲学家柏拉图（Plato）而不是某个物理学家提出的（那时还没发明物理学家这个词呢），但是这个洞穴寓言的确能够帮助我们理清一些新千年的最激动人心的物理学思想。

洞穴寓言

告诉他们，我说，按字面上的意思理解，
真实不是别的，而是想象的影子。

柏拉图，《理想国》（*The Republic*）

伟大的希腊哲学家柏拉图在他著名的《对话录》中讲了下面这个理想实验。

假设有一群被锁在一个洞穴中的囚犯，他们无法扭头，所能看到的一切——自从他们有知觉以来所见过的一切——只是

洞穴的墙壁而已。囚徒的后面站着看守并且立有火把；火把和囚徒之间有供人行走的台阶。

在这样的条件下，囚徒们能看到些什么呢？

囚徒们可以在洞穴的墙壁上看到他们自己的影子。他们也能看到某个操纵木偶的人投下的影子。囚徒们还能看到操纵木偶的人举起来的任何东西。也就是说囚徒们看不到任何“真正的”东西；他们所能看到的一切都是他们看不到的真实物体投下来的二维影像。

囚徒们完全不知道这些影子的真正成因，所以他们就会将影子当作是真实存在的事物。柏拉图论证道，在这种氛围下，囚徒们将不可避免地误解真实世界的外貌。囚徒们只能相信他们生活在一个二维空间中。

仔细地观察墙上的影子，囚徒中的物理学家就会发展出一套理论，用以解释在他们的二维世界中物体是如何运动并且是如何相互作用的。这些理论必然会有一些不自洽之处，于是囚徒物理学家就会想能否找到某种“终极”理论来解释他们所观察到这个“世界”的一切。他们几乎不可能想到这个世界实际上是三维的。即使这些囚徒中的某个人打破枷锁，纵观整个洞穴的一切，窥见了三维世界固有的真谛；他也将会发现很难使他的同伴们相信他所说的一切。甚至，某些人可能会取笑嘲弄这个发现了真相的人，将他所说的一切说成是疯狂的想法。

尽管理论物理不是柏拉图的思考范畴，但他所讲述的这个寓言故事（图1）在某种层面上却反映了现今物理学的窘境。随着物理学家们不断地追寻基本定律，他们所研究的事实图景也越来越远离我们的日常生活经验。现代的物理学似乎要告诉

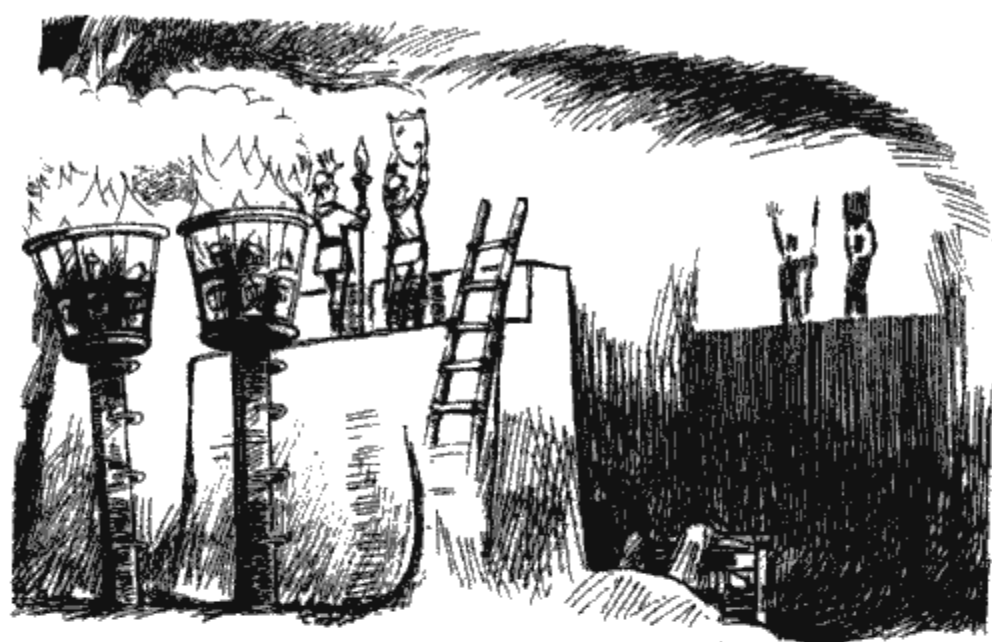


图1 柏拉图的洞穴寓言。囚犯被困在洞穴中，并且只能看到洞穴的墙壁。火炬将影子投到洞穴墙壁上；看守举起一张盾，火炬就会将盾的影子投到墙壁上。那么囚犯在谈论盾的时候，他们谈的是二维的影子还是真实的三维的盾牌呢？

我们，我们自身可能就处在柏拉图讲述的那些被锁住的囚徒的境地。我们感受到的只是这个世界的一部分，而真实的世界可能比我们想象的更加有趣也更加美妙。比如我们的理论暗示：空间维度或许并不仅仅是我们感受到的这三维，还可能是更多；而且，那些额外维度的大小可能比物理学家们以前认为的要大得多。另外一些物理学家认为我们的宇宙只是众多的平行宇宙中的一个——或许我们的宇宙就是形成于另外两个宇宙的碰撞。而且现代物理研究进展中的某些迹象表明，柏拉图寓言的字面意思可能是真的：或许我们日常所感受到的真实性只是一个更高维度时空的墙上的“影子”。

这些想法与我们的日常生活经验如此之远，以至于有些人⁷会死心塌地地认为物理学家们搞错了。不过也许物理学家就是那个挣脱了枷锁看到了洞中镜像的人；而我们其他人还是被锁在那里看着墙上的影子。我们当然不能嘲笑探索这些想法的物理学家，不能将他们看成是疯子；假如他们中的某人恰巧在公园中和你坐在一长凳上的话，你也不必溜到一边去。本书的目的就是试着去厘清那些想法的脉络——审视现代物理学的这些疯狂想法。

柏拉图寓言

柏拉图之所以要提出洞穴寓言，是希望探索“型相领域 (realm of form)”的某些性质。柏拉图认为型相的概念是古希腊哲学中最神秘的一个：物理世界中变化的问题。如果真像后来的哲学家赫拉克利特 (Heraclitus) 认为的那样，除了变化没有什么确定的，那么我们如何了解事物呢？甚至我们怎样来讨论任何事物呢？比如，我们怎样来讨论狗？任何一只狗都与其他狗不同，而且任何一只狗每时每刻都在不停地变化——从出生到死亡——处于一刻不休的变化之中。按赫拉克利特的说法，这些都不是同一只狗，我们怎么讨论狗呢？我们都不知道我们讨论的是哪一只狗。柏拉图对这个谜题的回答出现在西方哲学最有影响力的一部著作之中。柏拉图在《理想国》(The Republic) 中提出，可理解的世界是由事物的外部型相组成。比如，一只狗的型相是抽象的，不变的，对于所有的狗都成立的——甚至直到世界上所有的狗都消失的那一天，我们还是可以使用狗这个概念。可理解的世界只来自于人



的理性而且是实在性的世界。人类生活在可见的世界——充满变化以及不确定的世界。可见的世界只是完美的型相领域的一个不完美的表象。当我们指着一条狗说“狗”时，只有当我们所指的是“狗性”——一只狗的型相时，我们的话才有意义。柏拉图想用他的洞穴寓言说明的正是这个型相的概念。柏拉图当然毫不知晓现代物理学原理——但他的寓言与现代物理学中关于时空本性的思想不谋而合。

1133P43 K26.34

寻找对称性

世间只有一样好，那就是知识；

世间只有一种恶，那就是无知。

苏格拉底 (Socrates)

在试图理解物理学家们提出的有关实在的新物理图景时，我们会遇到一个麻烦（噩梦般的数学困难没有算进去）：绝对不会有实验证据。我们所能依靠的只是理想实验。

事实上，物理学家们的处境极为尴尬。一方面，我们在第二章中将会讨论到，物理学家们拥有两个现代科学中最成功的理论。微观尺度上，对物质的基本组成及其相互作用的研究可以总结为粒子物理学的所谓标准模型。（我们将在第三章及第四章中详细讨论标准模型。）从理论上讲，标准模型为所有已知的物理现象提供了微观基础（除了引力，这一点很重要）。宏观尺度上，我们最好的引力理论——广义相对论——可以解

释小到全球卫星定位系统中的脉冲同步，大到可观测宇宙中最大结构的形成等这些截然不同的物理现象。这两座理论大厦的成就是 20 世纪科学的制高点。

而另一方面，人们有理由相信，我们现有的理论并不完备。最大的问题在于我们最好的这两大理论并不相容。在基本层面看来，广义相对论与标准模型之间存在矛盾。如果我们想将引力与粒子物理统一到一个和谐的概念体系下，我们还需要一些激进的新想法。四百年来，物理学家一直由实验指引。要是没有实验结果做我们的向导，我们从哪获取新思想的灵感，又怎么检验新思想是否有效呢？我们究竟该如何解释没有可靠的实验检验的理论提议呢？

这些问题的答案可能就存在于我们渴望拥有的统一理论中。我们想要的是在一个独一无二的理论框架中解释所有观测到的物理现象，这样的框架应该更加简洁，更加美妙，比相互矛盾着的理论的合集——即使两种方法都能解释同一种观测现象——具有更多的对称性。就像在艺术领域一样，我们也寻求科学中的简单性——美与对称性。事实上，对称性是科学中最古老最重要的统一概念之一。如果只有实验已不足以帮助我们构建理论，或许对美的追求还能为我们带来新的指引。寻找新的理论可能会变成寻找新的对称性。在所有假象中寻找对称性的希腊哲学家可能会很欣赏这种方法。

寻找对称性一次又一次地获得了丰厚的回报。爱因斯坦发展他的相对论时就从对称性中获益匪浅。在爱因斯坦的带领下，理论学家们在他们的理论中寻找每一种对称性。对称性的方法与大量的实验结果组合到一起，物理学家们发展出了标准



模型。有趣的是，同样出于对称性的考虑，人们发现了标准模型的不足之处。第五章将详细解释我们如何利用新的对称性来修复标准模型中的问题，虽然我们还没能够在大自然中发现这些新的对称性。

如果我们来一个大跳跃，不仅仅假设新的对称性，还假设有新的空间维度存在（见第六章）；假设大自然的基石并非是粒子物理中熟悉的类点结构（见第七章）；那么我们会发现自己正向着统一理论前进。不过这种前进需要我们付出一定的代价，其代价就是我们所讨论的这一切都将远离我们的日常生活经验：新的理论框架中最基本的研究对象是存在于更高时空维度中的“膜”；其中一个宇宙中的居民将无法察觉与其相距几毫米之远的另一个宇宙。这些想法将会在第八到第十章中讨论。

本书中，我们将通过逐一解释物理学家们被迫走过的路程来搞清楚现代物理学中那些疯狂的想法。需要知道的是，迫使物理学家前进的并不是实验，而是对称性。最终，我们当然需要用实验来告诉我们哪些想法是真正的物理，哪些想法只是一个像柏拉图的洞穴寓言一样的故事。艾萨克·牛顿（Issac Newton），一位在构建物理学基础方面比所有其他人做的都多的伟大物理学家，深知实验的重要性。当一个朋友告诉他实验观测（后来发现实验搞错了）与牛顿系统不符合的时候，他的回答是：“也许真是那样吧。没有什么论证能敌得过事实与实验。”一个令人兴奋不已的可能性是：我们可能在不久的将来就可用实验检验那些疯狂的想法。未来的几年里，现在正在筹建中的实验将告诉我们是否生活在一个比我们看到的更加奇特

的宇宙中——这些问题是最后一章将要讨论的内容。

我们先来看一下关键的对称性概念，以此来开始我们的旅程。

第一章 对称性

在物理学中，对称性是一个非常重要的概念。它描述了物理定律在某种变换下保持不变的性质。这种不变性通常与守恒定律相联系。例如，时间平移对称性对应于能量守恒，空间平移对称性对应于动量守恒，而旋转对称性对应于角动量守恒。

(Camille Paglia) 亚里山大·米卡
(Sexual Personae) 《真面目》

在物理学中，对称性是一个非常重要的概念。它描述了物理定律在某种变换下保持不变的性质。这种不变性通常与守恒定律相联系。例如，时间平移对称性对应于能量守恒，空间平移对称性对应于动量守恒，而旋转对称性对应于角动量守恒。在量子力学中，对称性还导致了量子态的简并，即具有相同能量的不同量子态的存在。此外，对称性在粒子物理学中起着核心作用，因为它帮助我们理解基本粒子的相互作用和分类。

在物理学中，对称性是一个非常重要的概念。它描述了物理定律在某种变换下保持不变的性质。这种不变性通常与守恒定律相联系。例如，时间平移对称性对应于能量守恒，空间平移对称性对应于动量守恒，而旋转对称性对应于角动量守恒。在量子力学中，对称性还导致了量子态的简并，即具有相同能量的不同量子态的存在。此外，对称性在粒子物理学中起着核心作用，因为它帮助我们理解基本粒子的相互作用和分类。

美是我们面对大自然时的武器；正是由于对美的追求，我们将极限、对称、比例添加到我们制造的物中。美羁绊冻结了自然的融流。

卡米尔·帕格里亚 (Camille Paglia),
《性面具》(*Sexual Personae*)

由多边形平面围起来的立体称为多面体。尽管这个定义有点抽象，但多面体本身还是比较简单的研究对象。在我们的人造世界中多面体无处不在。比如生活中常见的一个多面体——早餐麦片盒：盒子的每一个面都是一个矩形（有四条边的多边形），每个矩形的边与其他矩形的边接到一起构成一个密闭的盒子。不难理解，我们可以构建无数种不同的多面体。即使正多面体也是彼此不同的。

由正多边形——所有的边以及所有的角都相等的多面体，比如等边三角形与正方形——组成的多面体称为正多面体。正多面体之所以很特别在于它具有高度的对称性：无论你转到正

多面体的哪一个面，它们看起来都一样。装麦片的那个盒子就不是这样，换个面看起来就不同了。（麦片盒的正面有 *Krispy Chocco Korn* 的标识；相对小些的侧面列着营养成分；上面最小的一面用于打开盒子。）这样的盒子显然不具有正多面体那样的对称性。

值得注意的是，只有五种正多面体：正四面体，立方体，¹⁰ 正八面体，正十二面体，正二十面体（图 2）。再没有其他的正多面体了。（交于正多面体一个定点的正多边形内角和必须要小于 360° ，只有这五种正多面体满足这种限制。）人们早就知道这一点；柏拉图在他的名著《蒂迈欧篇》（*Timaeus*）中描述了这五种正多面体。为了向柏拉图表示敬意，这些对称的研究对象现在一般称为柏拉图立体。

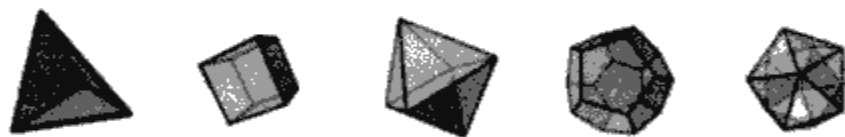


图 2 五种理想立体。从左到右依次为：四面体（面为 4 个等边三角形），正方体（面为 6 个正方形），八面体（8 个等边三角形），十二面体（12 个五边形），以及二十面体（20 个等边三角形）。2003 年，数学家杰弗里·威克斯（Jeffrey Weeks）提出在所有这些立体中，二十面体需要特别对待：他对宇宙微波背景波动的分析得出了一条令人难以想象的线索——也许我们的宇宙是一个二十面体

你也许会问，希腊人为什么要不厌其烦地研究这样一些抽象的柏拉图立体。原因很简单：希腊人钟情于对称性。希腊人在所有的人类活动中寻找对称性，而不只是在数学中。他们将对称性看成是一个统一的概念。希腊人对于对称性的这种痴迷



在现代科学中延续了下来。无论是在生物、化学、晶体学、数学还是其他领域中，对称性都是一个很重要的概念。我们在后面的章节中将会看到，对称性在物理学中也起着很基本的作用。那么，对称性指的究竟是什么呢？

在日常生活中，我们有一些对称性的直观概念：如果我们对某个物体进行了某种操作，而该物体在操作前后没有发生变化，则我们可以说该物体具有对称性。比如，当你用手指转球的时候，无论从哪个方向看来，转动中的球都是一样的。所以我们说足球具有转动对称性。第二种柏拉图立体——立方体也具有转动对称性，只不过立方体的转动对称性没有球多：只有在转动 90° 的整数倍时——每次转 90° 或 180° 又或 270° 等时，立方体看起来才会与转动前一样。

技术上来说，对称性的科学定义与我们的日常生活中的感受差不多。当我们按某种方式变换物体时，该物体变换前后不发生变化，则我们称该物体具有对称性。也就是说，对称性就是变化下的不变性。这就是对称性的本质。定义的简洁很具有欺骗性；循着对称性的理论不断地追寻，我们不得不一再重新认识物理世界。在我们研究物理学中的对称性之前，先来了解一下对称性的基本方面。

日常生活中的对称性

人体总是对称的，各个部分，双臂如此，其他也是如此。

乔治·赫伯特 (George Herbert), 《圣堂》(The Temple)

考虑下面的变换。将位于某根轴一边的所有点都反射到轴的另一边，从而建立一个系统的镜像。如果该系统在这种操作前后保持不变，则该系统具有**反射对称性**。这一对称性或许是人们最了解的对称性。如果你让人们举出对称性的例子，相信很多人都会举这个例子。

人体本身就具有两边对称性：将你的左边和右边互换一下，估计你很难看出有什么变化。当然，人体的这种左右互换对称性并不完美，比如说心脏就长在左边，而肝脏长在右边，这样的事情就会破坏对称性。不过近似地看来，我们的身体具有镜像反射对称性。这种对称性是所有人类在根本上所具有的对称，不分种族。人们也喜欢这种对称。比如，相比于不规则的婴儿，人们更加喜爱非常对称的婴儿；人们一般认为对称的脸比不对称的脸更有吸引力（图3）。（我们并不知道人类喜爱对称性是否由于对称的身体显示出天然的健康感觉，又或者是否因为人类的认知系统更易于接收对称信号而不是不对称信号。）

反射下的不变性（比如人体的两边对称性）与转动下的不变性（比如足球的转动对称性）相当不同。前者是分立对称性，而后者是连续对称性。连续对称性对任意小变换均成立。比如，无论你将一个球转动多少角度——多小都行——转动对



图3 这是一张复合肖像，来自于七位妇女肖像的组合。研究表明，人们一般认为这种具有高度反射对称性的复合肖像很美丽。所有文化氛围下的人们都同意这样的肖像比组成这幅肖像的七张个人肖像更有吸引力

称性都成立。而分立对称性则不是这样，分立对称性有一个“变换单位”。比如，镜子的反射就是对称变换；而三分之一的反射则不是。这两种不同的对称性——分立对称性与连续对称性——具有不同的数学性质；不过我们稍后将会看到，两者在物理学中都起重要作用。

各个领域的艺术家都要用到对称性，只不过其中一些采用对称性设计来创造美；而另外一些则专以破坏对称性来创造美。比如，东方艺术家设计的地毯中就常常蕴藏着各种各样复杂的对称性。（但也常常添加一些精妙的对称性破缺。丰富的变化比一直重复的图案具有更多的妙趣。见图4）



图4 图中这样的东方地毯可以有无数种图样，但是对称性限制了图样的重复。事实上，对基本图样的重复可以被分为四种操作。技巧熟练的织工按编织序列重复编织，从而编织出许多对称图样的地毯。技艺高超的织工会很巧妙地破坏对称——也许只是很轻微的破坏——来织出赏心悦目的地毯



对称性也是各式花样的壁纸的一大特色。只要你能保持一个前提——将两片墙纸相对于彼此移动一定距离后，整体效果不发生变化——你就可以将墙纸排成很多种花样，而这就是变换下的不变性——对称性。

对称性与壁纸

如果你认为壁纸排列出来的式样可以有无穷多种的话，那你就错了。本质上，只有 17 种不同式样的墙纸；你在商店中看到的那些花样繁多的壁纸的图案总和也就是 17 种。[这一点首先由晶体学家伊弗格拉夫·费德洛夫 (Evgraf Fedorov) 于 1891 年证明。费德洛夫感兴趣的当然不是家居装潢，而是材料中自然存在的排列模式有多少。] 西班牙的摩尔人从艺术的角度仔细探究过这些壁纸式样。摩尔人是虔诚的伊斯兰信徒，出于宗教的理由，摩尔人创立出来一套非具象派的艺术形式并将其发展到很高级的程度，其中很多艺术形式都具有几何形式的风格；摩尔人建于 13 世纪的诸王豪华宫殿阿尔罕布拉宫 (Alhambra)，在装饰上用到了所有这 17 种类型的壁纸；图 5 所示的就是其中的 3 种。

即使不考虑其装潢情况，很多建筑物本身就具有对称性。建筑师们长久以来一直将对称性融入到他们的设计中 (图 6)。很多宗教建筑具有反射对称性。这或许是因为在很多文化中，对称性等同于完美；因此只有对称的建筑才适合供奉上帝。永久性的建筑通常也具有对称性。想想美国的五角大楼，那就是一个具有转动对称性的建筑：如果你可以将五角大楼拿起来转

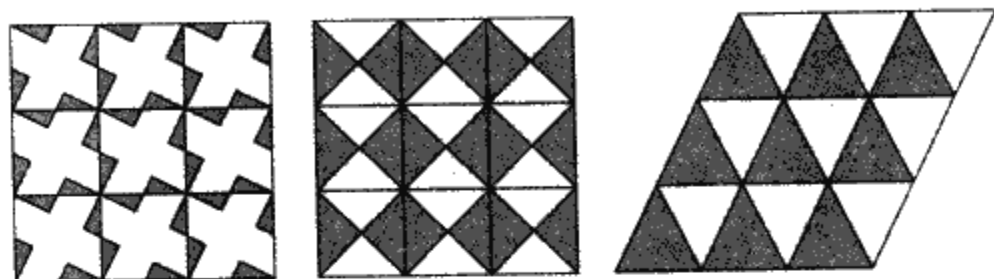


图5 1891年，俄罗斯晶体学家伊弗格拉夫·费德洛夫证明平面上只能有17种不同类的图样，因此只能有17种根本上不同类的壁纸。图中是其中3种

动 72° ——一圈的 $1/5$ ——然后再把它放回到地面，则它看起来就像没变化一样。五重转动对称性当然比球体所具有的无限多种可能的转动对称性少很多，不过仍不失为一种令人印象深刻的对称结构。有一些现代建筑师会有意破坏掉建筑物中的对称性，从而创造出与众不同的视觉美景——坐落于毕尔巴鄂（西班牙北部港市）的古根汉姆博物馆（Guggenheim Museum）就是一个这样的例子（图7）。¹⁴

对称的观念，或者对称性故意破坏的观念常见于各种艺术形式之中。例如，荷兰艺术家莫里兹·埃舍尔（Maurits Escher）的很多画作和木雕作品都具有对称的观念。这位艺术家常常采用17种壁纸图案来创造有趣的效果。埃舍尔的一些艺术作品中所展示出来的数学观念相当深奥，比如，图119就是用一些具有视觉冲击力的对称性阐明负曲率几何的概念。

对称性在音乐艺术中也无处不在——只需要想想巴赫的作品《音乐的奉献》，你就会明白这一点。诗的押韵与韵律方案同样具有潜在的对称结构。大自然更是展示对称性的绝佳舞



图6 正如在其他的艺术形式中一样，对称性在建筑艺术中也是基本的概念。对称性在具有神圣意义的建筑中尤为重要：长方形基督教堂——图中所示的是位于阿西希（Assisi）的圣弗朗西斯大教堂——总是具有两边对称性。在这些建筑物中，对称轴具有象征意义

台，我们可以从中发现很多最美丽的对称性。雪花就是其中之一，并且从很多方面来看，微渺的雪花是大自然中最富震撼性的对称结构。

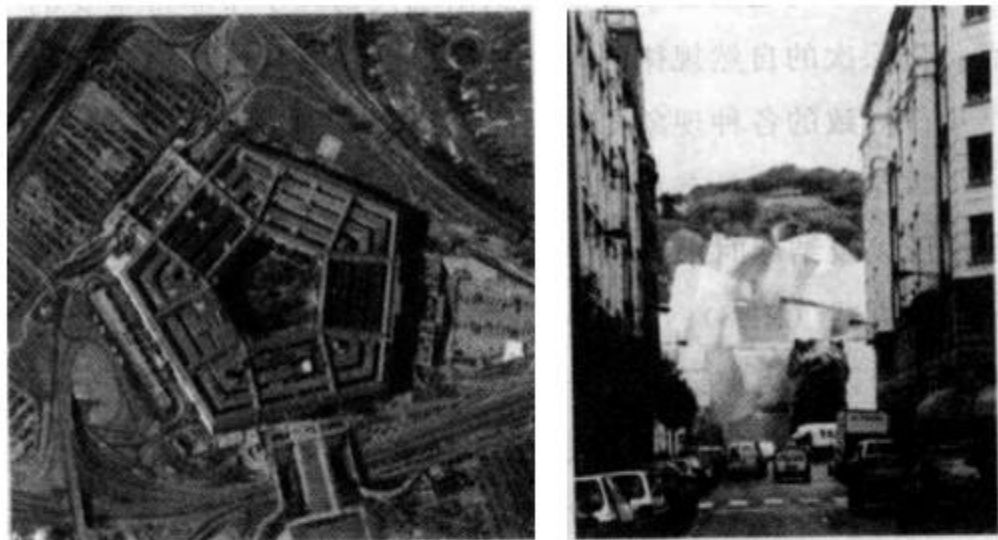


图7 五边形（左图）具有五重转动对称性，如果五角大楼的墙外没有任何标志，则转动 72° 后，整个大楼看起来原封未动。右图是位于毕尔巴鄂（西班牙北部港市）的古根汉姆博物馆，与左图截然不同，这里没有任何对称性；在人们的经验中，一座建筑物总是具有一定的对称性的，因此这样的一座建筑极具震撼效果

雪花

15

雪花生于其中的空气是多么的富于创造力呀！
我几乎将这些雪花误认为刚刚掉落在我腿上的星星了。

亨利·戴维·梭罗（Henry David Thoreau），
《航海日记》（*Journal*）

雪花既极端复杂又美丽异常——所有的雪花都具有简单的六重转动对称性。大自然中怎么会有如此简洁又如此复杂的结



构呢？这个问题的答案可以反映出现代物理学中非常重要的一点：深层次的自然规律同时具有简单性与对称性；但由这些基本规律导致的各种现象却可能非常复杂且难于理解。

雪花之所以具有六重转动对称性，其基本原因在于水的分子性质以及结冰时水分子中的两个氢原子与一个氧原子连接到一起的方式（图 8）。分子堆到一起形成规则的晶体网格，而相关的分子内力保证了分子处于最稳定的结构。这一现象中最稳定的结构是六边形。深层次上格点的六重转动对称性意味着所有的雪花都将具有这一对称性。仔细地思考一下我们就会发现，上面所说的必定不是故事的全部。因为分子力是作用在分子尺度上的，而与之相比雪花要大上百万倍。这种短程的分子力怎么会生成大尺度上的对称性呢？原来，冰晶体可以形成某种平滑表面，称为琢面。要形成冰晶体首先要有一粒“种子”，这粒种子通常是附着了水分子的尘埃，它具有很多不规则的表面。这些不规则的表面上有很多的“钩子”，可以将空气中飘动的水分子钩住，钩住的水分子迅速抹平了“种子”的不规则表面。而另一方面，分子水平上的琢面非常的光滑；几乎没有什么“钩子”来抓住水分子，相应地，生长起来就会慢些。上面两种情况合起来的结果就是，粗糙表面迅速生长成平滑状，只剩下缓慢生长的琢面。在这个过程中，“种子”就会迅速地长成六棱柱形了。

不过新长出的小小六棱柱冰晶体还不是故事的全部。小小的冰晶体看起来就像是六角螺钉的头。这个小东西又是如何长出我们熟悉的雪花那复杂又迷人的结构呢？晶体柱的角比边向空气中伸出的更多一些，所以角就会生长得更快一些，于是很

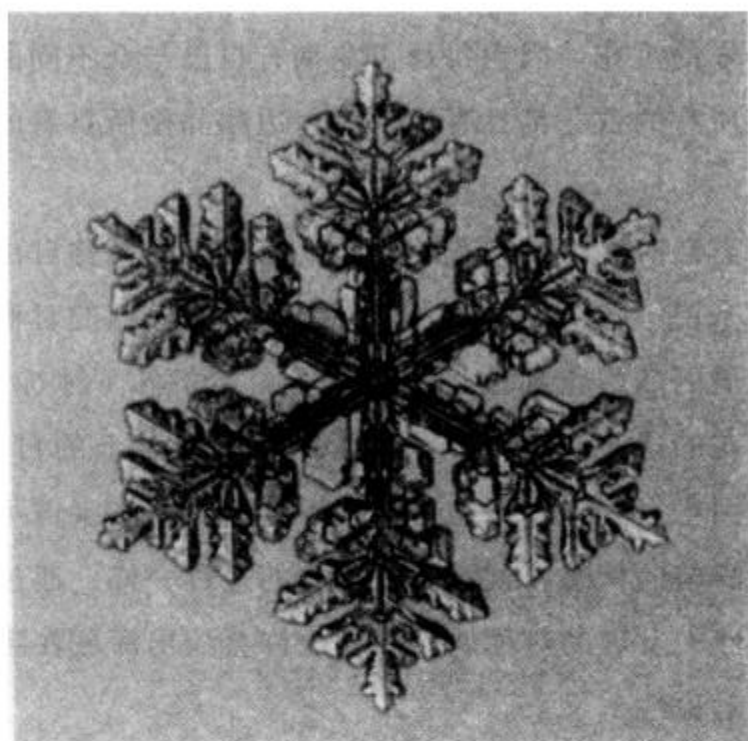


图8 具有大家熟悉的六重转动对称性的雪花。雪花之所以具有这样的对称性在于：冰冻时，分子内力使水分子形成六角点阵

快就可以长出一些细小的“须子”。因为晶体周围的条件都一样（冰晶体毕竟很小，在晶体长度内，周围的大气条件不会有明显的变化），所以所有的须子都按相同的速率生长。这样一来，冰晶体就长出了它的六重转动对称性结构。但是大气条件会慢慢地变化，温度也忽高忽低变化不停，风也可能将我们讨论的这个东西吹到不同温度的地方，又因为晶体的生长条件取决于周围的温度，所以晶体在生长时会随着时间变化而变化，从而长出复杂美丽的形状。不过，不管周围的总体条件怎么变，晶体的每根“须子”总是与其他的“须子”处于相同的条件下，所以晶体一直保持它的六重转动对称性。最后，我们



得到的就是一片片独一无二的美丽雪花：大自然中没法形成两个完全一样的雪花，因为每片雪花都有自己与众不同的生长故事。但是所有的雪花都具有根本的六边冰晶格所具有的六重转动对称性。

处于高温时，组成雪花的元素具有更高的对称自由度：对于水分子来说，各个方向都是等同的。具有较低的对称自由度但却复杂美丽的雪花就是在这简单的初始条件下冰冻而出的。适用于雪花的这些原理可能同样适用于大尺度上的自然现象。我们在后面将会看到，人类目前了解的这个复杂宇宙可能也是脱胎于很简单的状态。就像研究雪花的过程一样，通过研究现今在大自然中发现的对称性，我们也许会找出深藏在宇宙之后的深层次对称性。

物理学中的对称性

怎样不朽的手或眼呀，竟能勾画出你那可怖的对称？

威廉·布雷克 (William Blake), 《虎》(The Tiger)

雪花的对称性只是我们在大自然中发现的众多对称性中的一种。在本书中，我们将更加细致入微地讨论很多在物理学中发现的对称性。其实，正是对不同对称性的追寻推动着很多现代物理理论向前进展。在开始迎战现代物理学中各种神秘的对称性之前，我们先来看看在已经建立的物理学大厦中，对称性所扮演的核心角色。我们可以在物理学各个分支中找出大量的例子。这里我们只举其中的两个——诺特 (Noether) 定理与

狭义相对论——就足以阐明对称性在我们探索宇宙的奥秘过程中所展现出来的巨大威力了。

诺特定理

有些对称性明显、直观，看起来不值得特别地讨论一番。但是充分地理解了这些对称性会有助于我们欣赏人类关于大自然的智慧中最重要的内容之一：诺特定理。

我们现在来对一个物理对象做下列变换：将一个物体从一处移动（或者用术语说，**平移**）到另一处。这样的操作称为**空间平移**，这一变换差不多是最简单的变换了。稍稍思考一下，我们就会明白，这种变换事实上是一种精确对称性变换。把一把椅子从你的餐厅移到卧室，然后想一想你的椅子可有哪种物理性质由于这次平移而发生改变——组成椅子的亚原子粒子并没有在移动之后发生改变；椅子颜色、强度和形状取决于椅子的分子性质，这些分子性质移动后也没有发生改变。因此，物理学家们用以描述椅子性质的任何物理学内容——描述椅子的承重能力，或者电阻，又或者光吸收性质的方程——在空间平移后都没有发生改变。我们也可以将同样的论述应用于任何系统以及任何空间中的平移。由空间中移动物体这样的操作组成的变换前后，物理定律保持不变。而变换下的不变性，正是对称性的真正含义。自然定律在空间平移变化下具有对称性。事实上，我们的宇宙并不是非得如此不可：我们完全可以构建一个具有晶体结构的宇宙，其中一个实验的结果一定要与平移的方向有关。但在现实中，我们的宇宙可不是这样。

18

下面是另一个关于变换的例子：时间平移——物理对象在



时间上的平移。(这种变换并不需要时间机器；它的意思只是，我们可以在不同的时间测量某个系统——无论现在、过去还是未来。)物理定律在时间平移变换下具有不变性。比如，假如你需要测量你家餐厅椅子的电阻，那么不论你是今天测，昨天测，还是明天测，你得到的结果都是一样的（这里当然需要假定是在其他条件一致，而且你不曾也不会在某些地方修整你的椅子）。如同空间平移一样，大自然也具有时间平移对称性。

另外一个简单的例子是转动下的物理定律的对称性。比如，你家餐厅的椅子不管是朝向北方还是朝向东方，它的性质都一如既往。

以上的三个对称性例子——物理定律在空间平移、时间平移以及转动下具有不变性——是观测事实。或许未来的某天，人们可能会观测到破坏这三种对称性的物理事实，不过这一天还没有到来。物理学家、天文学家、地理学家们已经做过大量的实验并且留下了数量惊人的观测记录，其中无一提到上述三种对称性破缺的例子。任何旨在描述宇宙的方程必须满足这三个简单对称性的要求。这些看似简单的事实到底重要在哪里呢？

19

变换下具有不变性意味着某些量在整个变换过程中没有改变——或者说守恒。所以毫不奇怪，对称性与我们所拥有的最基本、最具广泛性以及最强大的物理定律——守恒律——有某种联系。1915年，德国数学家艾米·诺特（图9）证明了一条著名的定理：物理定律的任意一种连续对称性都对应着一条守恒律；反之，每一条守恒律都对应着一种连续对称性。这条定理本身也是物理学家们苦苦追寻对称性的一个原因。



图9 艾米·诺特

考虑一组研究对象——比如说台球桌上的台球，只不过我们这里要求它们具有完美的弹性，也就是说不会因为摩擦等原因损失动量。这些球在一个封闭孤立的球台内到处乱撞。我们可以将这个球台在空间中平移到另外一个地方，显然球台内的物理定律不会发生任何变化。根据诺特定理，物理定律在空间平移下的不变性会导致动量守恒。所以，无论球台内的球何时如何彼此碰撞，它们的总动量在空间平移操作前后保持不变。这就是我们所熟悉的动量守恒定律，每天全世界的台球桌上都上演着同样的守恒过程（实际中会由于外力——摩擦力的存在破坏该守恒）。相反，大量的实验——从台球桌到粒子加速器——在精确地表明动量守恒的同时，也表明在空间平移变换



下，空间是对称的。也就是说，空间是均匀的。

根据诺特定理，物理定律在时间平移下的不变性意味着能量守恒。不论封闭系统内的物体如何彼此相互作用，其总能量在相互作用前后保持不变，这就是能量守恒定律。同时，所有那些精确证明了能量守恒的效应——比如，每天都在电站发生的效应——同时证明了物理定律在过去、现在、未来都一样。

最后，根据诺特定理，物理定律在转动下的不变性意味着角动量守恒。不论封闭系统内的物体何时如何彼此相互作用，其作用之前的总角动量总是和作用之后的总角动量一样。这就是角动量守恒定律。再次要说，所有那些精确证明了角动量守恒的观测——从滑冰的人将双手收拢时可以加速到星震之后的中子星将改变其转动速率——同时证明了物理定律在转动变换下具有对称性。也就是说，空间是各向同性的。

人们早就承认了守恒律，但正是对守恒律的这种熟知蒙蔽了我们的眼睛，导致我们没有注意到它们是关于我们这个宇宙的知识中最值得注意以及最基本的部分。从根本上讲，守恒律可以从对称性中推出。

你或许会认为，我们在上面的讨论中忽略了宇宙中一种重要的不变性：物理定律在左右互换时的不变性。这种对称性称为**镜像对称性**。如果还用你餐厅中的那把椅子做某些实验，你所得到的结果肯定会与你对椅子的镜像所做的实验得到的结果一样。

表达某种事物奇或偶的一般性术语是**宇称**（parity）。在镜

像变换中，这个术语是空间宇称 (space parity)^①。一个物体的宇称刻画的是当这个物体的坐标反演时该物体的性质。1956年之前，物理学家们一直想当然地认为物理定律在空间宇称变换下保持不变：在镜子中观测一个实验，结果自然与直接观测的结果相同。正如真空 (empty space) 所具有的均匀性会导致动量守恒，而各向同性会导致角动量守恒；你也许会认为，真空的这种镜像反射会导致空间宇称守恒，那么你就错了！

研究表明宇称并不守恒；真空也能区分左右。某些基本粒子在参与一些相互作用时是左撇子。就像一个顺时针旋进的螺母一样，这些基本粒子具有特定的螺旋性。在镜像反射中，顺时针旋进的螺母变成了逆时针旋进的螺母。所以镜像中的大自然有所不同。

当人们在 20 世纪 50 年代末发现这一事实时，相当多的物理学家感到非常震惊。今天的物理学家们已经完全接受了这一事实。基本的物理学定律必须要产生某些不具有镜像对称性的过程。用这个领域中的术语来说，大自然具有手征性。[手征 (chiral) 这个词来自于希腊语的手；也就是说，大自然具有先天的手性。] 20 世纪最伟大的物理学家之一沃尔夫冈·泡利 (Wolfgang Pauli) 说得最好：“上帝是个左撇子。”

由上可见，找出一个理论的对称性非常重要。而发现一个

① 译者注：这里要指出的是，parity 的本意是“称”，奇偶的意思。最早人们提的 parity 就是特指 space parity，汉语的译法就是宇称；后来又提出其他一些 parity，如 G-parity, R-parity 等，相应的汉译就是 G 宇称，R 宇称。也就是说，我们在汉语中将 parity 一律译为宇称，而 space parity 也译为宇称；对于其他的 parity，前面再加上名字即可，比如 G 宇称、R 宇称。



理论所不具有的对称性——或者一个理论对称性破缺的方式——可能同样重要。

狭义相对论

爱因斯坦（图 10）的狭义相对论基于对称性和不变性的概念。〔爱因斯坦曾一度想将其称为“不变论”（invariance theory）。〕正确了解狭义相对论特殊的对称性有助于我们了解关于宇宙的一些基本知识。

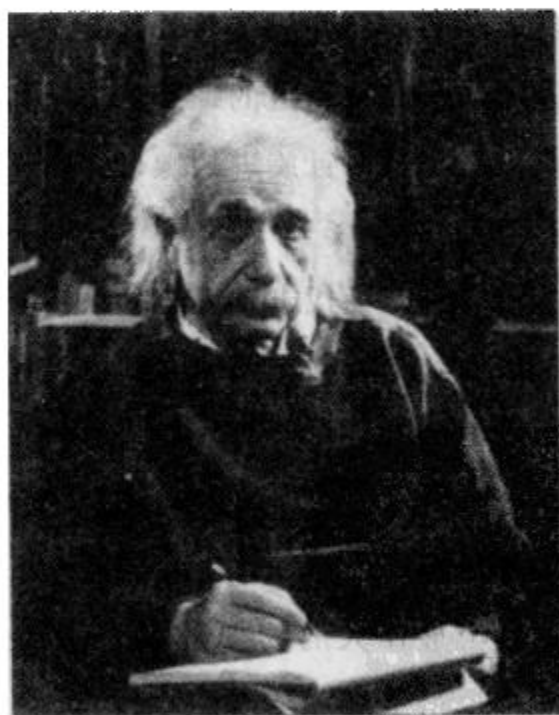


图 10 阿尔伯特·爱因斯坦

爱因斯坦于 1905 年发表他的狭义相对论。在那之前，物理学家们在计算长度和速度之类的物理量时根据的是伽利略的物理思想。我们假设你要测量你家餐厅中椅子的长度。那么你首先要做的就是赋予每个椅子腿的底部一组由三个数组成的坐

标，每个坐标代表一个空间维度。[在后面的章节中我们将会讨论到更高维度的时空。但是当然，我们能看到的只是三个空间维度，所以我们先回到 17 世纪，勒奈·笛卡儿（René Descartes）证明需要三个数——或者说坐标——才能表达三维空间中的一个点。] 然后你再赋予椅背的顶部一组三个数的坐标。然后你就可以利用一种可以一直追溯到毕达哥拉斯（Pythagoras）的数学方法计算出这些点之间的距离：两点之间的距离的平方等于两点间各个坐标差的平方和。当然，在实际中，你只需要拿个尺子量出长度就可以了——不过这样直接量出与我才描述的冗长过程是等价的。

假设你现在要求你的朋友按上面列出的毕达哥拉斯方法量出相同椅子的长度，他把椅子平放到地面上来测量距离。于是他就有了一个完全不同的坐标系，并且会给每一个定点不同的坐标值。但是由于物理方程具有转动不变性，所以两种测量方法所给出来的结果必定是一样的；你朋友用两点之间坐标差的平方和测量出来的结果必定与你用相同方法测量出来的一样。也就是说，这个物理量——两点之间的距离平方——在转动下具有不变性。你完全可以把这个性质当作是转动对称性的定义。

需要注意的是，在上面的讨论中我们并没有提到何时进行测量。伽利略体系中，时间和空间坐标是彼此独立的；所有的惯性观测者（自由运动且不受外力作用的观测者）测得的时间相同。时间具有普适性。

爱因斯坦不能同意这一点。在将时间考虑进去后，爱因斯坦扩充了转动下不变的概念。他利用一个理想实验进行分析，



假定其中惯性观测者处于相对运动，那么来看一下这样的观测者将会测得什么样的结果。深思熟虑之后，爱因斯坦指出我们的物理世界由一个事件的网络组成，所谓事件指的是某个瞬时发生在空间中某个点上的现象。我们研究物理就是观察和测量事件。事件必须用四个坐标来标记：三个区分空间中位置的坐标和一个区分时间的坐标。但是时间坐标并不独立于空间坐标。爱因斯坦的老师赫曼·闵可夫斯基（Hermann Minkowski）后来总结提出，时间和空间坐标彼此纠缠不清，因此我们必须将四维时空视作一个整体。

这样的观点与我们关于宇宙原理的朴素认识相悖。根据我们头脑中的模型，我们生活在三维空间中，而时间与空间完全不同。我们头脑中的这个模型非常实际：之所以如此，是因为在我们的生活的氛围中，完全可以想当然地认为物体有其固有时间。物体的运动速度很慢，所以我们可以将时间单独提出来。但我们头脑中的这个模型是错误的，无数的实验表明爱因斯坦才是正确的。我们不是生活在时间和空间之中，而是生活在时空中。

当一个点粒子穿过时空时，它的轨迹为一条线——该粒子的世界线，这条线就是这个粒子的全部历史。（你身体中的每个粒子都会描绘出一条世界线，如果有某个神一般的人物可以置身时空之外，那么你的一生在他的眼里就是粒子世界线的集合；所有的这些世界线收敛于你出生之时，犹如一条条蠕虫在时空中蜿蜒行进，你死之后它们各按自己行程独立继续前进。）通过考察光子的世界线以及它们是如何与事件联系起来的，爱因斯坦发现了时空间隔的概念。两个事件之间的时空间隔类似

于两点之间的空间距离。对于所有的惯性观测者来说，两个事件之间的时空间隔都一样。例如，考虑下面的事件：空间中的某点有一个鞭炮炸响；不同的点上另一个鞭炮炸响。在测量餐厅椅子时，尽管你和你的朋友眼中的椅子有一个转动的差别，但你们得到的结果是一样的；现在你来测量两次爆炸事件的时空间隔，你会发现不管你是相对静止还是处于相对匀速运动中，你所测得的时空间隔都是一样的。对于任何一个惯性系中的观测者来说，不管他处于匀速相对运动与否，所测得的两个爆炸之间的时空间隔都是一样的。

改变观测者速度的变换称为**赝移动**（boost），所以爱因斯坦认为时空间隔在赝移动下具有**不变性**。一旦出现了变换下的不变性，我们就知道有某种对称性存在。这里确实有一个对称性，即**洛伦兹不变性**（Lorentz invariance）。对称性以荷兰物理学家洛伦兹的名字命名，因为这位物理学家首先发现了狭义相对论的某些关键思想。（根据诺特定理，我们知道洛伦兹不变性必然导致某个守恒律。的确有一个守恒量与洛伦兹不变性有关，但是由于这个量只具有技术上的意义，所以我们在后面就不提了。）

23

爱因斯坦认为基本的物理定律必须具有洛伦兹不变性。如果基本的物理定律不具有洛伦兹不变性，那么处于相对运动中的不同观测者就会测得不同的基本物理定律。这就像将一把椅子转动后它的长度就要发生变换一样荒谬。

根据狭义相对论，任何旨在描述宇宙的方程都要具有洛伦兹不变性。这虽然是一个看似简单的要求，但从中可以涌现出很多古怪的现象。任何一本相对论方面比较好的书都可以详细



地解释这些现象背后的相对论原理（如果读者想要进一步了解，可以参见相关的参考文献）。但是大多数的教科书中都忽略了很重要的一点，那就是这些现象都是来自于对称性的要求。

时空间隔的公式类似于两点之间距离的毕达哥拉斯公式。但是，我们测量时间和距离时用的是不同的单位。为了将两者统一描述，我们必须为空间和时间引入一个变换因子；也就是说，我们必须引入一个固定速度；这个固定速度用符号 c 表示，正是我们熟知的光速。在不同的介质中传播的光子可能有不同的速度，但是 c 只有一个，它是光子在真空中的传播速度； c 比光子恰好所处的任意一种速度更加重要。真空中的光速是一个基本物理常数，用来刻画时间与空间之间的关系。这里的基本要点是存在一个速度使得时空间隔在转动与变速下具有不变性。

洛伦兹对称性就是狭义相对论的一切。这种对称性会产生在我们通常的低速世界中观测不到的现象。比如，通过光信号相连的时空间隔总是零。这就意味着所有的观测者将测得相同的光速，无论他们运动与否。但在伽利略物理体系中，假如你以 $3c/4$ 的速度跟在光后面运动，那么你测得的光速就是 $c/4$ ；如果你以 c 与光并行运动，在你眼里，光速就是零；如果你比光速快，那么你就能超过光。而在狭义相对论中，所有这些都是不可能的。因为所有的观测者测得的光速都只能是 c 。

如果所有的观测者测得的光速都一样，那么我们熟悉的速

度加法公式就不再正确。比如，如果一支射线枪可以发射出速度为 $0.9c$ 的子弹，你在一个以 $0.9c$ 的速度运动的火箭中向前射出子弹，相对于地球上的观测者，子弹的速度不可能是 $1.8c$ 。根据狭义相对论公式，这个相对速度应该是 $0.9945c$ 。这就是狭义相对论的一个著名论断：没有什么物体可以比光速快。

相对论性速度加法需要新的公式，爱因斯坦之前的物理学家们之所以没能发现这一点是因为他们所讨论的都是低速运动，这里的低速当然是相对于光速来说。1905 年，爱因斯坦发表他的理论之时，汽车速度首次超过 100 英里每小时（mph，1 英里约 1.6 千米）。但 100mph 只相当于光速的 0.0005% ；这样的速度下，相对论效应完全可以忽略！

爱因斯坦之前，不同惯性观测者测得的坐标关系由一组著名的公式描述：那就是伽利略变换。伽利略变换非常精确地描述了我们日常生活的低速世界；在伽利略变换下，我们测得的时间相同，我们测得的距离不取决于速度，如此等等。伽利略变化与我们的日常经验精确地符合。但是我们知道伽利略变换并不正确，因为它不具有洛伦兹不变性。不同惯性观测者之间正确的坐标关系公式是洛伦兹变换。正如爱因斯坦所说的那样，洛伦兹变换将时间坐标和空间坐标混合起来。以接近于光速运动的惯性观测者测得的时间将与处于相对静止中的观测者所测得的时间不同；这种现象称为时间膨胀，通常的说法就是“运动的钟变慢”。以接近于光速运动的惯性观测者测得的距离也将与处于相对静止的观测者测得的距离不同；这种现象称为



长度收缩。我们运动得越快，钟就会走得越慢，尺也会变得越短。（所以，在以接近于光速运动的宇宙飞船中的宇航员测得的距离将比地球上的观测者测得的相同距离短。宇航员衰老的也会慢些。在他返回地球时，他会发现他的朋友已经苍老或者死亡，可是他自己却依然年轻。）

25

物理学家在实验室中所做的大量实验最后都要归结到用钟和尺测量。如果钟真的能变慢而尺能缩短，我们就要重新审视一下那些我们一直当成常数的定义量。爱因斯坦特别指出，能量是根据一些用钟表和尺子测出的量定义的。因此我们需要小心地考察一下能量定义。举例来说，枪中射出的子弹具有一定能量。假设我们可以发明出来一种“超级枪”，从中发射出来的子弹速度可以接近于光速；则洛伦兹对称性将使我们能够对子弹的很多性质测得不同的值。爱因斯坦证明，子弹的质量将随着子弹的速度加快而变大，增大的质量来自于增加的能量。于是，爱因斯坦得到了狭义相对论最著名的预言：质量与能量是等价的，这个等价关系为 $E=mc^2$ 。这个方程表明，我们可以将能量转化为质量，反之亦然。我们知道 c^2 是一个很大的量，所以很小的质量就可以产生巨大的能量，这就是原子弹的最基本原理。这个结果令人相当吃惊。物理学家以前一直以为能量和质量是彼此独立的；可是爱因斯坦却找到了一条原理将两者联系了起来。从此以后，人们认识到物质可以创造也可以消灭——只要对应上的能量改变即可。质量只是能量的另一种形式——一种高度凝聚的状态。

时间与空间，物质与能量并不是像日常生活告诉我们的那样是绝对的不变的量。这些量要取决于观测者。只有这样，才

能保证一种深层的对称性成立，这种对称性就是：所有的惯性观测者所测得的两个事件的时空间隔相同。狭义相对论中之所以会出现各种古怪的现象，其根本原因在于时空具有对称性——洛伦兹对称性。

群论：对称性的数学

数学是关于模式的学问，而宇宙的全部就是模式。

卢迪·拉克 (Rudy Rucker), 《思想工具》(Mind Tools)

数学是物理学的语言。专门用来描述对称性的数学是群论。对于物理学来说，群的概念如此重要，以至于群论的术语频繁地出现在物理学文献中。尽管本书是写给一般公众看的因而只包含了很少的数学内容，但是，简明扼要地介绍一下群论的基本内容仍是必要且有益的。

雪花的对称性



26

仔细地观察雪花，我们会发现它有无穷多的花样，但是它的对称性却极为有限：仅有很少的几种变换可以保持雪花原状不变。实际上，你可以用一个正六边形来代表雪花，这样就可以找出保持这个正六边形原状不变的所有可能变换。下面我们一一介绍。第一种变换，分别按 0° 、 60° 、 120° 、 180° 、 240° 和 300° 绕中心转动这个正六边形，你会发现这个正六边形没有发生变化。这说明正六边形具有六重转动对称性。第二种变换，按六个过中心（以及一对定点或者一对棱边中点）的镜面反



射，该六边形仍然保持不变。用一对纸板在一个正六边形上比划几下，你很快就会相信上面所说的确实就是正六边形的所有对称变换了。正六边形共有 12 种对称性。所以，虽然雪花的形态千奇百怪，它的基本对称变换却只有 12 种。因此对称性大大地简化了雪花的复杂性。（图 11 中展示的就是这 12 种对称性。）

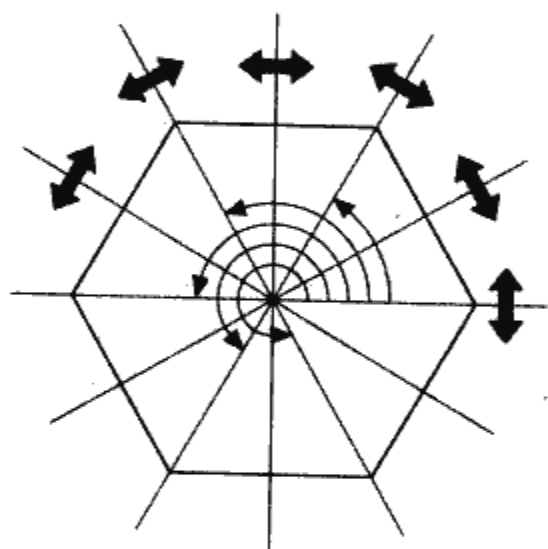


图 11 六边形的对称性

令正六边形具有的这 12 种对称变换构成一个集合，我们发现这个集合具有四个性质。首先，该集合具有**封闭性**。（封闭性意味着，如果我们对正六边形连续实施两种集合内的变换，那么其结果相当于实施了集合的某一种变换。）第二点，该集合要满足**结合律**。（考虑三种变换，分别为 A, B, C。第一次操作时，依次按 A, B, C 顺序变换；第二次操作时按 B, C, A 的顺序进行变换。两次不同顺序的操作应该给出相同的结果。或许这一点听起来有点复杂。直白一点的

说法就是，对于相同的变换操作，结果不受变换顺序影响。）第三点，该集合中必须有**单位元**。（所谓单位元就是什么都没改变的变换操作。以转动为例，单位元就是 0° 变换，也就是说转了 0° 角，这当然是什么都没做。）第四点，该集合中的每一种变换必须有**逆元**存在。（这里的逆元指的就是逆变换，某种变换及其逆变换先后进行相当于无任何操作，就像用单位元作用一样。）

任何一个具有封闭性、满足结合律、具有单位元并且每个元素都有逆元的集合就是一个群。

对于数学家来说，群就是具有四种简单性质（如上面文字“雪花的对称性”中所描述的四种种性质）的集合。从法国年轻的数学家伊瓦里斯特·伽罗瓦（Évariste Galois）写下这个题目的几个关键结果算起，数学家们研究群论的历史已经超过170年了。与群论有关的文献数量巨大。群论已经成为了数学中极为重要的一部分，现今学校中已经开始讲授群论的一些基本内容。群论中发展起来的一些高级技术威力非常强大，很多用其他方法不能解决的问题到了群论中便迎刃而解。不过从根本上讲，群论只是一门描述对称性的学科。所以，只要科学家们在他们的研究过程中遇到了对称性——不管是晶体学、分子振动还是物质的基本组成中的对称性——他们所要做的仅仅是选择恰当的群，然后就可以找出一堆现成的数学结果与工具来分析这种对称性。

在雪花的对称性问题中，需要用到的群称为二面体群。当然这个群到底叫什么名字无关紧要；关键在于几代数学家和科



学家已经仔细研究过这个群的性质。所以，如果某位物理学家认为他正在研究的材料样品具有正六边形对称性，那么他就可以使用属于二面体群的现成结果来研究他的材料样品的各种性质。

群有很多种不同类型，每一种类型的群对应于众多对称性变换中的一种。分立对称性，比如雪花的镜像反射就是分立对称性，是直观上最简单的对称性；而且分立对称性在基础物理学中扮演重要角色。而复杂些的连续对称性以及描述它们的群则更加重要。特别是所谓的李群扮演的是最关键的角色。这些各种各样的群描述了宇宙最基本要素的对称性。

李群是根据 19 世纪挪威数学家索夫斯·李 (Sophus Lie, 见图 12) 而命名。李要做的是将连续对称群分为几类，在他的先驱工作后，数学家们已经为所有可能的连续对称性分了类。(分立对称性的完整分类更加复杂，直到近年才最终完成。)



图 12 索夫斯·李

李群中很重要的一类是 $SO(N)$ 群，或者称为 N 阶特殊正交群，其中 N 为整数。其本身名字无关紧要。我们不管术语说的是什麼，简单的说 $SO(N)$ 群描述的是 N 维空间中的转动对称性。如果我们能够认识到具有这种对称性的物体可以是一个光滑球——比如说一个篮球，我们就不会觉得有多复杂了。任意选定一个过圆心的轴，我们就可以绕着这个轴转动篮球；不管你在三维空间中转了多少度，球总是一个样子。所以我们说篮球具有三维转动不变性。篮球的这种转动对称性就可以用 $SO(3)$ 群描述——这里的 3 指的是三维空间。

李也探讨了 $U(N)$ 群： N 阶么正群。这种类型的群中最简单的一个是 $U(1)$ 群，后面我们将会看到描述电磁场的方程就具有这种对称性。李还讨论了 $SU(N)$ 群：特殊 N 阶么正群。上述的这些群描述的都是抽象的对称性，因此我们很难找到一个直观上具有 $SU(N)$ 对称性的例子。本质上这些对称性都很简单，比如说： $SU(2)$ 群就是将两个物体“转动”到彼此；而 $SU(3)$ 群就是将三个物体“转动”到彼此。在本书的后面，我们将会看到这些群在基础物理学中扮演着重要角色。

$SO(N)$ 群， $SU(N)$ 群，连同另外一类李群 $Sp(N)$ 群——辛群，是所谓的“经典”群。这些群应用在物理学上已经相当久了。除了经典李群，还有五种例外李群： $G(2)$ 群， $F(4)$ 群， $E(6)$ 群， $E(7)$ 群和 $E(8)$ 群。比起经典群，这些群受到的限制更多。例外群所描述的对称性并不是用雪花或者篮球这些日常生活中常见的事物就能够说明的。数学家们只是通过抽象的数学推演得出这些群的性质。最大最神秘的例外群为 $E(8)$ 群，这是一个二四八维的研究对象，其性质数



学家们仍在探索中。我们在后面将会看到， $E(8)$ 群在统一引力与其他力的尝试中将起到重要作用。

二面体群的有关知识有助于科学家们研究晶体的性质；同样的， $U(1)$ 群， $SU(2)$ 群， $SU(3)$ 群以及 $E(8)$ 群也将有助于科学家们研究物质的基本组成要素。关于这些研究对象的文献日新月异。幸运的是，我们要牢牢记在脑海中的只有一点：所有这些群描述的只是不同类型的对称性。

第二章 | 物理学的两大支柱

29

爱因斯坦的狭义相对论和广义相对论永远地改变了我们对于时间空间和引力的认识。而另一个同过去彻底决裂的理论——量子力学——则改变了我们用以描述大自然的语言：我们不再讨论有确定位置和速度的粒子，而是学着说波函数几率之类的语言……如今，我们跟随前人的脚步继续前进。

史蒂文·温伯格 (Steven Weinberg),
《终极理论之梦》(*Dreams of a Final Theory*)

很多研究生课程中都设有“现代物理”之类的内容。通常意义上的“现代物理”包括两大块内容：相对论与量子力学。这两个理论无疑是现代物理学的两大支柱，正是基于这两个理论，我们有了今日对宇宙的认识。之所以说它们现代，其原因在于这两个理论所处理的问题与我们的日常生活几乎毫无关系。比如，从相对论我们知道，我们对时间的测量取决于我们在引力场中所处的位置；量子力学则迫使我们放弃研究对象必



须有确定的位置和动量这样的概念。用那些讨厌的术语说，位置和动量这样的概念是所谓的极端条件下的概念。不得不说一下的是，这里所说的这些“现代”思想都已经有很悠久的历史了，而我们在本书后面一些章节中遇到的各种概念则并非如此。狭义相对论差不多足有 100 年的历史了；爱因斯坦对狭义相对论思想的推广——广义相对论——大约诞生于 90 年之前；在这两个理论诞生不久，量子力学就进入了物理学家的视野。这些理论既不是未经尝试，也不是未经检验；正相反，这两个理论都取得了巨大的成功，所以我们才将它们传授给学生。

一个理论的成功与否取决于其给出的数值预言是否与观测相符，只有当我们使用这个理论计算出来的结果与实验上测得的结果差不多时，我们才能说一个理论获得了成功。按这种定义，广义相对论与量子力学都算是极为成功的理论。从纯智力的角度来看，这很令人欢欣鼓舞；不过成功的理论并不仅仅只有智力上的意义，还有很多实际功用。一个成功的例子就是全球卫星定位系统（GPS），这种技术需要精确的运用相对论和量子力学。我们之所以通过讨论 GPS 开始本章是因为它的存在凸现了物理学核心的一个矛盾：虽然在某种意义上广义相对论和量子力学都是“正确的”，但从根本上讲，两者却是不相容的。

全球卫星定位系统

我曾经迷失，但已找回自我。

约翰·牛顿 (John Newton),

《不可思议的优雅》(Amazing Grace)

全球卫星定位系统或许会被评为最不可思议的现代技术。今天，从游艇驾驶者和汽车司机到徒步旅行者与登山运动员，成千上万的人需要全球卫星定位系统来告诉他们当前那些GPS使用者正处于地球的什么位置。当然，军事上更是大量地使用全球卫星定位系统。该系统也可以用于监控大陆板块运动；找寻非洲大陆上大象的移动；定位电缆上出错的部分；校准金融交易时间。每年，这个系统都会增加很多新功用。

全球卫星定位系统共由24颗卫星组成，这些卫星在地球上空2万千米高空绕地球运行（图13）。这些卫星恰当地分布于地球上空，在地球上大多数的位置，任何时刻上空都至少有4颗卫星。每颗卫星绕地球一周的时间都是精确的半天时间，这样，世界上任何一个固定位置的观测者每天都可以看到同一卫星一天经过头顶上空两次。每一颗卫星上都装有一座原子钟。原子钟可以精确报时，其基本的工作原理就是狭义相对论——对所有观测者来说光速都是某一常数，人们可以使用原子钟作为精确的导航系统。全球卫星定位系统的工作原理是：卫星持续不断地发射编码的无线电信号，GPS接收器（如今这些接收器甚至小到可以戴在手腕上）可以接收到这些信号。

31



假定地球表面的某个接收器同时接到了其上空 4 颗卫星的编码信号脉冲，通过编码信号脉冲所携带的信息可以知道脉冲的发射时间，同时我们知道信号是以光速运动的，这样接收器内的计算机就可以计算出距离每一颗卫星的距离，有了这 4 颗卫星距离的数据，就足以计算出接收器所处的精确坐标；从本质上讲全球卫星定位系统是三角测量——某一个点的位置可以通过测量与另两个精确定位点之间的距离来确定——的高技术形式。几个世纪以来，三角测量一直用于航海。



图 13 全球定位系统 (GPS) 使用 24 颗在地球上空 2 万千米处绕地球飞行的卫星。对于地球表面的大部分地区，任意时刻，地平线上都至少有 4 颗卫星

上面讲述的工作原理一目了然，不过工程师们成功地研制出导航系统之前还是遇到了许多的困难（图 14）。

如果我们要求 GPS 可以精确到 1 米，那么卫星中的电子钟就要精确到 $1/10^{13}$ 。没关系：原子钟可以有这样的精确性，

而且原子钟频繁地由位于美国海军天文台的计时器校准。但是，我们稍后会看到，相对论效应对原子钟的影响要远远大于 $1/10^{13}$ 。事实上，相对论效应带来的影响大概是原子钟精确度的 1 万倍，因此完全不能被忽略掉。在设计全球卫星定位系统时必须将相对论——爱因斯坦的时空观——所带来的复杂性考虑进去。

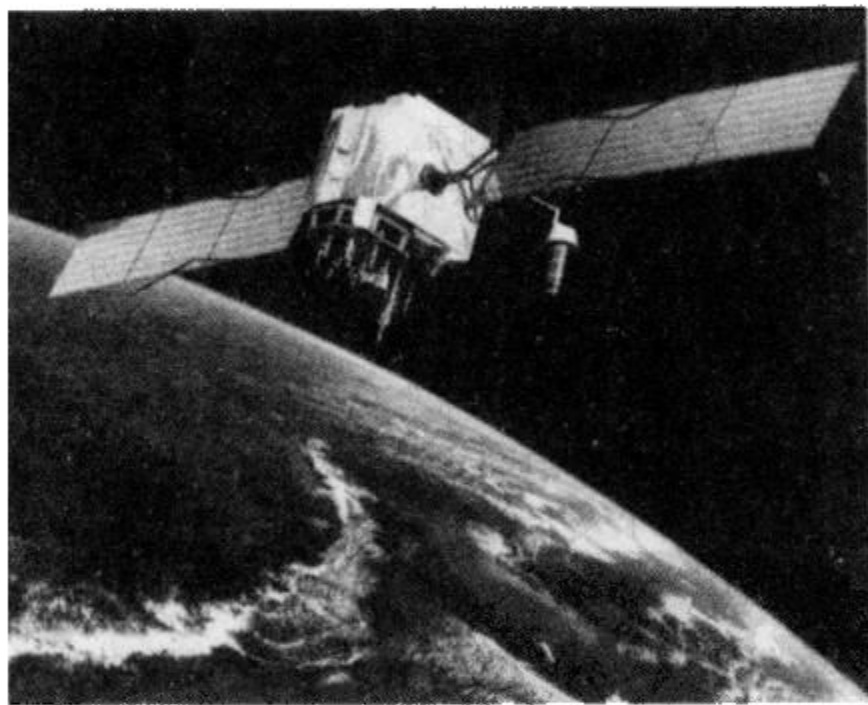


图 14 GPS 是由美国国防部系统所设计，可以提供全球范围内的三维定位信息。英国用户也可以接入系统，精确性略差。20 世纪 70 年代的研究人员用第一代的 Block I 型卫星测试了 GPS 系统概念的可行性；目前的系统使用的是第二代的 Block II 型卫星，图中即为该种卫星中的一颗

前面我们已经讲过，根据狭义相对论的对称性要求，处于相对运动中的不同观测者对同一事件的测量会得到不同的时

32



间。简单地说就是“运动的钟变慢”。GPS 卫星中的原子钟当然与地球表面的接收器相对运动。一般的卫星速度是每秒 4 千米，相当于比原子钟慢了 $1/10^{10}$ ——大约相当于 300 年分之一秒。而且，因为卫星轨道是椭圆的，所以卫星与地球的相对位置改变的时候会加速或减速。（这就是另一个对称性效应——角动量守恒的结果。）所以卫星沿轨道运动的时候相对时间膨胀会有所变化；接收器必须将这些效应考虑到计算中。即使这样还没有了结全部的麻烦，GPS 电子钟的守时性所受的更大的影响来自于广义相对论的预言。我们稍后会看到，引力场中不同位置处的原子钟会记录下不同的时间。GPS 卫星上的原子钟在地球上方很远的位置：比接收器高了大约 2 万千米。计算表明，卫星上的原子钟比地面上相同的钟快了 $5/10^{10}$ 。同样的，这种“引力场中的时间膨胀”也是随着所处地球轨道位置变化而变化的。相对于地球上的接收器，卫星处于旋转中，于是就会出现另一个广义相对论现象——所谓的萨格纳克效应（Sagnac effect）。所有这些效应，再加上另外一些更精细的相对论效应，必须要加到计算中。只有这样，GPS 才能具有 1 米的精确性。

33

通常人们总说广义相对论只能在一些极端的天文学情况中得到检验，在日常生活中差不多完全没有用。而在卫星定位系统中则不是这样，如果不将相对论效应考虑进去，全球卫星定位系统就不能正常工作。广义相对论在一项最令人激动的现代技术中扮演关键角色。

上述讨论中未加考虑的是工程能力，我们通常想当然地认为不存在工程技术问题。制造原子钟；制造既能够处理考虑了

相对论效应的复杂数学计算，又足够小以便能置于便携式接收器内的计算机（图 15）；发展校对系统所需要的通信网络——所有这些我们日常生活中接触到的工程技术能力看起来不值得



图 15 实际中能够使用的 GPS 接收器必须足够。

者和登山者随身携带；图中这样的接收器只有手机大小。像这样的 GPS 装置就可以连续地接收 GPS 卫星的编码无线信号。任何时刻，都可以接收到 24 颗卫星中的 4 颗发来的信号。装置内部的计算机分别计算出 4 颗卫星的距离。卫星的位置可以精确地确定，编码信号携带有从卫星发射来的具体时间信号，这样，GPS 接收器所在的位置就可以确定下来，误差仅在几米之内。



一提。这种观点其实是不正确的。事实上，在微观水平上操纵物质和场是非常神奇的一件事。西方文明的各种技术产品——电视机、电脑、自动洗衣机、磁共振扫描仪还有其他——都是建立在物理学家对电流的了解基础之上，但它们真正成为现实还是在我们拥有了现代物理学的另一支柱——量子力学——之后。没有量子力学，人们就不可能发展出全球卫星定位系统这样的技术。

34

但是这里却有一个矛盾。全球卫星定位系统之所以实现，是因为我们有了一套同时使用到了广义相对论与量子力学的成熟技术。没有广义相对论，我们就不可能校准时间，系统就会毫无价值；而没有量子力学，我们甚至不能造出这套系统。在某种意义上，全球卫星定位系统要求广义相对论和量子力学都必须是“正确的”。但是这两大支柱背后的基本假设却彼此不相容。

今天的大多数物理学家都相信主宰宇宙中一切的规律应该是量子定律。但量子力学遭遇广义相对论时，一切就会毫无意义。我们怎么会有两个彼此矛盾的理论呢？用一个理论就能解释所有的物理现象岂不是更优雅、更漂亮、更富于对称性？

正是消除这种矛盾的想法促使科学家们不断努力，各种试图使广义相对论与量子力学和谐共存的尝试给我们带来了许多“疯狂的想法”，我们的这本书将要探讨的就是这些“疯狂的想法”：奇特的新对称性，额外维度，平行宇宙。在我们欣赏这些新奇的想法之前，还是让我们来好好地看一下物理学的这两大支柱，看看它们为什么彼此矛盾。下面，我们先来讨论一下广义相对论。

大尺度物理：广义相对论

引力难道不够优秀吗？

布莱恩特 (Brilliant)，英国喜剧 *The Fast Show*

狭义相对论将优美的洛伦兹不变性嵌入到物理学中，但是爱因斯坦仍然不很满意。无论是在他自己的或者其他什么人的理论中，对称性仍然不够多。他对物理中对称性的热爱——他那执著的向往：相同的物理定律能对所有的一切都成立，不论在哪里或怎样运动——将他引向广义相对论。广义相对论是现有的关于引力及在大尺度上宇宙运行的最佳理论。我们一起来看看爱因斯坦究竟是如何想出了他的理论。

在狭义相对论中，惯性观测者有特殊的重要地位：只有这样的观测者才能意识到两个事件时空间隔的不变性。那么对于非惯性观测者呢？对于正处于加速中或受到力的作用的观测者来说是怎么样的呢？特别是对于处于引力场中的观测者情况如何呢？

35

爱因斯坦从一个简单的理想实验入手开始发展他的理论，从而实现了他自己称为一生中的“最快乐的思想”。想象一下，你正处于一间小而密封且完全没有窗户的房间中。如果房间没有加速，根据狭义相对论，你自然就不会知道你是否在运动及以多快的速度运动。事实上，如果你不能根据房间外部的物体来观测房间，则房间速度这样的概念毫无意义。你完全可以将你的房间想象为处于静止状态。如果考虑了加速度的影响，则



情况会完全不一样。有加速度时，不管你是否能根据房间外的物体进行观测，你都会感受到有一个力将你压向地板。我们称这样的力为“惯性力”。地球表面由于重力而有的加速度为 $1g$ ，显然在加速或减速的电梯中我们可能会遭遇更大的加速度。

假如在房间中有一台秤，你站在上面，记录下自己的重量。你能回答你是站在地球表面还是站在以 $1g$ 的加速度飞行的宇宙飞船中吗？这个问题爱因斯坦思考了很多年，最后的结论是“不”。这样就导致了一个基本想法：引力与加速度之间有密切的联系。爱因斯坦认识到局域的引力场和加速运动实际上是不能区分的——他将此称之为等效原理。这就是物理学中对称性的又一个优美的例子。

如果处于加速运动中却不在引力场中的观测者和在引力场中却没有加速运动的观测者没有区别的话，则我们总可以假定后者的观测是有效的。于是我们就可以说所有的观测者，无论他是否处于加速运动状态，都可以认为他们自己处于静止状态。只不过他们要加上相应的引力场来描述他们所处的瞬时环境。就这样，爱因斯坦推广了他的理论。

等效原理的一个直接推论是关于空间的一个惊人结论。再回到我们那间密封没有窗户且正在加速的房间中；也许房间正在火箭舱中加速。想象你自己正站在一面墙边，向对面的墙水平地发射出一道激光束，就在光线穿越墙间距离的这段时间里，你所在的火箭加速了一些，这样光束的实际击中位置在原来瞄准位置的略偏下方。换句话说，加速度使得光的运动路径看起来变弯了。同时等效原理告诉我们，我们也可以说引力场

能够并且必定使得光线弯曲。那这有什么惊奇的呢？惊奇之处就在于光的传播路径必须是两点之间的传播时间最短的路径；这是物理学已经被广泛证实的基本原理之一。通常我们认为两点之间的最短距离是直线，光就在两点之间按直线传播。因而我们一般就认为空间是平坦的欧几里得平面。（当然有人会说光有所谓的折射现象，没错，折射时光线的确发生弯曲了，正是这种现象使我们发明出眼镜或者望远镜之类的光学器具。但即使在发生折射现象的时候，光仍然是按照两点之间的传播时间最短的路径传播的。在我们讨论的问题中，我们选取的是光传播中最简单的情况：光在真空中传播。）如果光在引力场中传播时光线发生弯曲，则两点之间最短时间的传播路径应是一条曲线，而不是一条直线。这就意味着，如果有引力场存在的话，空间是弯曲的。

36

等效原理的另一个直接推论是关于时间的惊人结论，我们再次通过一个理想实验来看看会有什么样的结果。

想象一下，我们的宇宙飞船在太空中，通过发动机始终与地球保持一个不变的相对位置。这时，船长关掉发动机，在那一瞬间，飞船仍然相对地球保持静止，然后则由于地球引力场的存在而开始自由落体运动，飞船中的所有人都处于完全失重的状态，就是说他们完全没有重量。

固定在飞船天花板上的激光器在发动机关闭的一瞬间向着飞船地板发出一道脉冲。如果脉冲发射的时候你正好在激光器的下面，则你就可以测到这道光的频率。所测到的这个频率就是这道激光的“标准”频率——各种手册以及参考书中的值。站在房间中地板上的观测者也会测到相同的频率值，这是因为

37



整个房间中的情况与没有外场存在的惯性系的情况是一样的。那么对于站在地球表面或者说静止的处于地球的引力场中的观测者来说又是怎么样呢？他将测到的激光频率会有不同吗？考虑到激光发射时，激光器处于静止状态，因而他会同意你的“标准”频率是正确的。但是在激光射到地板上时，情况就不同了。由于飞船在引力场中具有加速度，因而获得了一定的向下运动的速度（见图 16）。这样，相对于地球的引力场静止的观测者将会测到一个相对高些的频率——就像当一辆救护车向着他开来时，他会听到更为尖锐的笛声一样。〔这种现象就是著名的多普勒（Doppler）频移，向着观测者运动的物体的辐射被“压缩”了，其辐射频率显得增高了，因而被称为“蓝移”；而远离观测者运动的物体的辐射被“拉长”了，其辐射频率显得降低了，因而被称为“红移”。〕

换句话说，向着引力场传播的光，频率变高（蓝移）；逆着引力场传播的光，频率降低（红移）。这类现象一般称为引力红移，是等效原理的一个直接推论。

当我们把思考对象转变为钟时，会得到令人吃惊的结论。原子向外辐射的激光频率极为稳定，实际上可以利用这一性质制作极为精确的原子钟。钟的根本含义是能在固定的时间间隔内重复同一动作的装置。不论是机械手表中固定转动的秒针还是原子中固定频率的辐射激光，都是这样简单动作的稳定重复。这样我们就会立即意识到，引力场中激光频率的改变实际上意味着引力场中不同位置时间的快慢是不同的。强引力场中的时间比弱引力场中的时间走得更慢。〔这种效应已经被实验检验。实验人员在美国的柏德（Boulder，科罗拉多州）放置

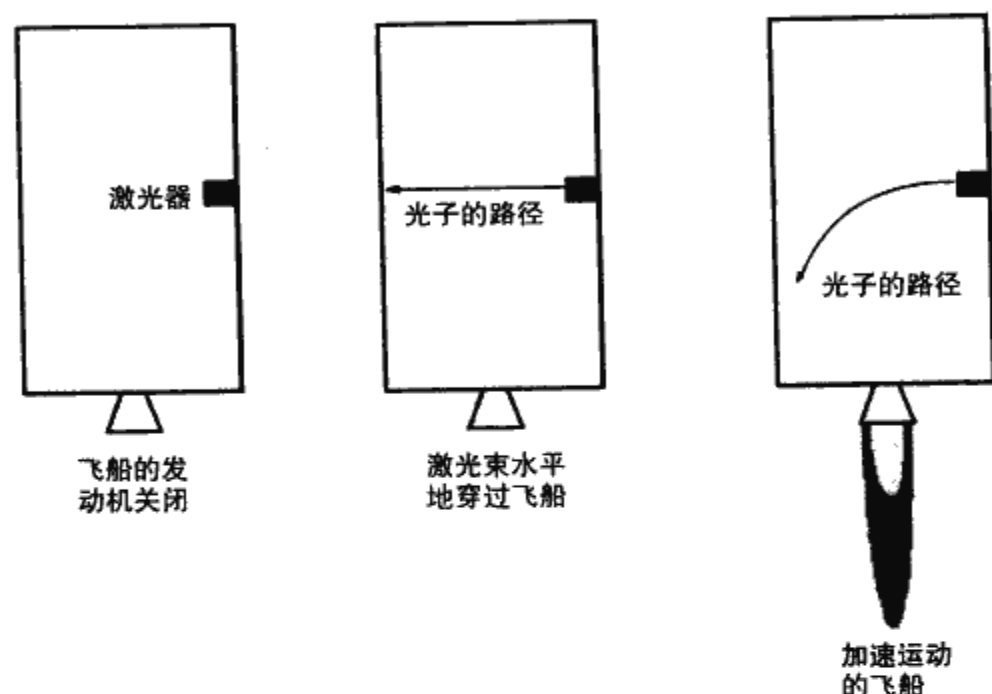


图 16 广义相对论告诉我们光子在引力场中下落

了一台可以精确到每年一微秒误差的原子标准钟，在英国的格林尼治（Greenwich）皇家天文台放置了另一台一模一样的钟。柏德海拔 1650 米，格林尼治皇家天文台基本同海平面，放置在柏德的钟每年比放置在格林尼治皇家天文台的钟快 5 微秒。因而，GPS 必须考虑到引力红移的影响。]

由上所述，引力场并不只弯曲空间，时间也会在引力场中弯曲。既然爱因斯坦早已指出了时间和空间不可分割的联系，那更好的说法是，引力可以弯曲时空。实际上，爱因斯坦认为引力就是时空几何结构的弯曲、扭曲！

正是爱因斯坦这卓越的洞察力使得我们重新考虑我们看待世界的方式。比如，地球之所以不按圆形轨道绕太阳运动是因

38



为有力的作用迫使它不能这样运动。更进一步说，地球是在按其时空中最直的路径运动，而时空的弯曲又是由于太阳的质量和能量造成的。

等效原理的直接推论是时空是弯曲的。爱因斯坦超越了一点，他的广义相对论详细地描述了引力。按照广义相对论方程可以精确地计算出给定的质量和能量分布所造成的时空弯曲的曲率；同样，人们也可以计算出粒子在弯曲时空中的运动轨迹。[广义相对论方程在形式上和谐完美极为简单，但在求解时却极为繁复。约翰·惠勒（John Wheeler）的一句名言准确地捕捉到了广义相对论方程的本质：“物质告诉时空如何弯曲，时空告诉物质如何运动（Matter tells space how to curve; space tells matter how to move）。”]除了引力红移和时空弯曲，广义相对论还有很多预言。广义相对论预言了黑洞和引力波的存在；掌控着天体的运动轨道；为了解宇宙提供了最佳的理论框架——将宇宙作为一个整体加以研究。

伴随着巨大的成功，人们普遍地把广义相对论当作是所有物理中最优美的理论。原因之一在于，在建构理论时，爱因斯坦为物理学引入了一种深奥的对称性：广义坐标不变性。也就是说，不论对哪个时空中的参考系观测者来说，理论在本质上都是一样的。这种深刻的对称性和等效原理用优美的几何概念进行描述时，广义相对论自然地诞生了。

根据牛顿的理论，任意两个物体之间有与其质量之积成正比，与物体之间距离平方成反比的引力相互作用。这一公式可以满足几乎全部实际需要。应用牛顿引力公式，我们可以让宇宙飞船在火星着陆；可以计算出弹道轨迹。只有少数例外——

比如有精细调节必要的全球定位系统等需要完整的广义相对论方程。宏观世界的物理需要广义相对论。但是，广义相对论不能用来讨论微观世界的物理——有比引力更重要的原理存在的区域中的物理。微观世界需要的是量子力学。

小尺度物理：量子的神秘世界

39

我认为完全可以说没有人真的了解量子力学。如果能够的话，那么你最好不要一直追问自己：“可是怎么会是那个样子？”因为你将不可救药地进入一条谁也逃不出来的死胡同。没人知道为什么会是那个样子。

理查德·菲利普·费曼 (Richard Philips Feynman),
《物理定律的特质》(The Character of Physical Law)

微观世界有很多种类类似于电子之类的实体，我们都称之为粒子。经典物理中，我们提到“粒子”一词时，脑海中立即出现的形象是硬的且毫无特点的某个东西——也许就像一个台球一样。经典物理中，你可以为像台球一样的粒子做个标签，而且一旦你知道作用于它的力或它所处的相互作用的情况，理论上你就可以精确地描述它的运动情况了。但是在 20 世纪早期，开始用传统办法探讨电子之类的微观粒子的行为时，人们发现，微观粒子并不遵守经典物理的法则。那些成功地描述了台球运动的定律在描述电子的运动时彻头彻尾地失败了。电子并不是一个台球或是其他什么常见东西的缩小版，而是完全新



颖神秘的研究对象。

根据你所选取来探测电子的实验装置的不同，有的时候你会观测到电子具有粒子的性质（例如，会在某个位置触发探测器）；而另一些时候，可能就会观测到电子具有波的性质（例如，可以与晶体发生衍射）。自然界中的基本实体自发地表现出来这种以经典物理的眼光看完全矛盾的两种性质，这就是所谓的波粒二相性。

我们再来看看电磁波。人们以前一直认为经典电磁场的麦克斯韦（Maxwell）方程已经完备地描述了电磁波的性质。当然，在一些情况下，电磁现象的确可以作为一种波的现象来描述；但是在另一些情况下，电磁现象最好用粒子的术语来描述。当物体辐射电磁波时，它实际上是发射出了一个量子粒子——光子——并且这个粒子具有一些类似于波的性质，诸如频率、波长等。

只要我们讨论或探测小尺度上的物质，就一定会和波粒二相性打交道。对这种波粒二相性的统一描述就是量子力学的内容。

于是我们有了两套力学体系：一个用于微观世界（量子力学）；另一个则是用于宏观世界（经典力学）。至少，从审美角度来看，这让人很不舒服。那么我们是否能够将这两种力学合而为一，给出唯一的一个力学体系呢？

很明显我们能够做到这一点的。

在某一个标度上，量子现象变得可观测，这个标度是自然界的一个基本常数，称为普朗克常数（Planck constant，符号 h ），所有的量子现象都离不开普朗克常数。例如，沿某一方向

以一定动量运动的电子所具有的类波性质——波长，其大小为 h 与动量之比。在经典力学中，这种类波性质消失，所以电子不显现出波的性质，而只有粒子的性质；再来考虑一束具有一定波长和频率的光子，其类粒子性质为能量动量等，其中能量等于 h 乘以频率，动量等于 h 除以波长。在经典力学中，这个类粒子性质消失，所以光只具有波的性质，而没有粒子的性质。当 h 趋于 0 的时候，我们由量子力学回到我们所熟悉的日常生活中的经典力学。因而，经典力学实际上是量子力学在 h 可以忽略的时候的极限。所以我们可以说：只有一个力学体系——量子力学！

普朗克常数

普朗克常数 h 的值，约等于 $6.6 \times 10^{-34} \text{Js}$ ，量纲与作用量（能量乘以时间）相同。

物理学中的普朗克常数有另一个更为常用的表示，用 h 除以 2π ，符号为 $\hbar$ ，读作“h-bar。”

我们知道普朗克常数有一个很小的值。与日常生活中处理的各种物理问题相比，普朗克常数都显得太小从而可以放心地将它忽略掉。普朗克常数太小了，我们的日常生活根本不可能感受到它所引起的任何量子效应，空间、时间、能量这些物理量总是连续的，粒子就是粒子，波就是波。

但是，尽管 h 很小，它也并非为零。当我们探索微观世界的话，就会不可避免地碰到大小可以与普朗克常数相比的物理量。这时，就难以避免要使用量子力学了。



也许，联系经典物理与量子力学的最好的原理就是所谓的不确定原理。为了更好地理解量子力学的这个原理，让我们来考虑一个具体的问题：我们怎样做才能“看到”一个电子并找到其位置。要看到任何东西，必须有光子从其上反弹回来。而且我们必须要用波长小于物体大小的光子，否则的话光子就会在物体周围弯曲而不是从物体上散射；换句话说，要是波长太长的话，光子就不能够反射回我们的眼睛或是显微镜。所以要想看到电子并精确地确定它的位置，我们就要用极短的波长，可是，从前面给出的波粒二相性关系，我们可以知道很短的波长意味着光子有一个很大的动量，而在光子与电子碰撞的时候，光子的动量就会传递给电子。于是我们可以精确地找到电子的位置，但是这样做的代价是接受电子的动量不能确定这个事实。我们也可以使用长波光，这样我们就不会很强烈地影响电子本身了——但是这样一来，我们就相当于用降低位置的精确性来交换提高动量的精确性了。我们不能够同时完全确定地描述这两个物理量。事实上，正如很多实验结果显示的那样，电子不能同时拥有确定的动量和位置。量子力学中，动量和位置这一对物理量不确定度的乘积有一个不可忽略的值（这个值用 h 的表达式构成。这里，我们再次看到普朗克常数如何统治着微观世界），这就是不确定原理。

另一个相关的不确定关系是关于时间和能量的。我们不能在足够小的时间间隔内确定地测量粒子的能量。如果在太小的时间间隔内测量，粒子的能量——甚至真空（empty space）的能量都会强烈地波动。

宏观系统的量子力学

从根本上看，量子力学当然是在独立粒子水平上起作用，在小尺度上，不确定原理用它自己的神秘方式影响着这个世界；但是，这并不代表量子力学不能在更大的系统中展示自己。

不久前，加利福尼亚大学圣巴巴拉分校的罗伯特·诺布尔（Robert Knobel）与安德鲁·克莱兰（Andrew Cleland）在宏观系统中观测到了不确定原理的作用。在他们两人的实验中用到震荡晶体杆（微米量级且被冷却到很低的温度）以及一台可以记录甚至只有原子直径百分之一大小的位移的运动探测器。当然，仅仅这样只是个微观系统，但若考虑到晶体杆的质量大约相当于一百亿个原子的质量，情况就不同了。利用这套实验装置，罗伯特·诺布尔与安德鲁·克莱兰观测到晶体杆——本质上的宏观系统——由于不确定原理而引起的振动。

另一个在宏观系统中观测到的纯量子力学效应是量子纠缠态的问题。描述两个或更多个彼此相关物体的量子态时就会遇到所谓的“量子态纠缠”问题，甚至在两个物体相距很远的时候也是如此。量子态纠缠导致物体之间的物理性质关联远远大于经典物理所允许的程度。处于量子态纠缠的两个粒子，若我们测量其中之一的量子态，则不用再次测量即可以推断出另一个粒子所处的量子态。未来的几十年，量子纠缠态的理论也许会发展成奇妙的新技术——诸如量子通信和量子计算——但到目前为止的研究只涉及亚原子粒子。不过我们也注意到，2003年，芝加哥大学的托马斯·罗森鲍姆（Thomas Rosenbaum）



及其英国和美国的同事已经观测到了磁化盐单晶体的量子纠缠现象。尽管相对于我们的日常生活这只是一个系统中的成功，但若以亚原子尺度的眼光来看，这已经是一个宏观系统了。看来我们是离不开量子力学了。

不确定原理似乎在说我们不能拥有一个数学上严格的理论来描述诸如电子之类的量子粒子。看起来我们完全没法知道一个电子的位置或者它的速度。幸运的是，事情并没坏到那种地步。20 世纪 20 年代，奥地利物理学家欧文·薛定谔（Owen Schrödinger）认识到尽管电子是一个点粒子，但它同时伴有一个波，这个波是电子位置及其他一些变量的函数。电子波函数满足数学上严格定义的一个波动方程——薛定谔方程。波函数可以告诉我们关于粒子的一切。关键在于：波函数的平方是在某一状态下找到某一粒子的几率（波是某种几率波）。

波函数是一个纯粹的量子思想，它使得那些在经典物理中不可能发生的现象有变化的可能。例如，我们可以将一个电子禁闭在一个盒子中，若电子没有足够的能量，则根据经典物理，电子将永远禁闭在盒子中；但是根据量子力学原理，电子的波函数可以弥漫到盒子外。这就意味着有可能有一个概率——虽然这个概率可能很小，但不管怎样这概率是存在的——在盒子外面发现这个电子。根据量子力学原理，一个电子可以隧穿到盒子外面。这种隧穿效应被用于一种称为隧穿二极管的量子力学装置中，应用在一些卫星通信系统的放大器上。如果没有量子力学的这种隧穿效应，这些设备就不能工作——而我们就不会有诸如全球定位系统这样的技术。

物理学理论的核心存在着一种随机性。不确定原理对我们能够知道什么加了很强的限制；如果我们试图从“现在”计算“未来”，我们只能得到统计结果和概率分布，对于任何给定过程，我们只能计算什么可能发生，而不能计算什么将要发生。

43

量子力学在自然科学的很多分支——天体物理学、化学、结晶学中都已成为重要的工具。所研究的这些系统大都是低速系统，因此相对论效应可以忽略，非相对论性量子力学就派上用场了。本书中我们所讨论的大部分问题是关于基本粒子及其相互作用，在我们将要讨论的这些情况中，粒子的速度一般接近光速，因此狭义相对论效应不能被忽略。研究速度接近于光速时的粒子的性质时，需要将狭义相对论与量子力学结合起来。将这两种理论组合起来并不容易，这个世界上最聪明的一些头脑花了将近 20 年的时间才能相信他们的组合是正确的。大约到 20 世纪 50 年代左右，这个组合起来的理论才差不多最终成形：这就是相对论性量子场论，关于基本粒子及其相互作用的最佳描述。相对论性量子场论是关于粒子及其相互作用很多基本方面的理论框架。尽管这个题目包含了很多复杂的技术，我们仍然无须求助于数学就可以理解其基本概念。在第三、第四章中我们将更加详细地了解相对论性量子场论；但现在了解一下这个词究竟是什么意思还是很值得的。我们已经知道了“相对论性”和“量子”，那么“场”究竟是什么意思呢？

场是一个有着悠久历史的概念，对于经典物理学家们来说，这是一个极为得力的概念。关于经典场的概念我们可以来看一个例子：海洋温度。我们可以赋予海洋中的某个位置一个对应于该点的温度值，这样我们就可以说海洋的温度是一个标



量场——海洋中任意一点的温度值都可以用一个量表示。这个量在不同点取不同的值（对应于海洋中不同点的不同温度值），并且随时间变化（海洋中温度的高低随着季节及每天不同时间而变化）。

矢量场指的则是在空间中的各点不止有大小也有方向的场。整个海洋中水流的速度就是一个矢量场：赋予海洋中的每一点一个量——该点的流速——及其流向。

场中可以有扰动，我们通常称之为扰动波。数学上，这些扰动用场方程描述。因而，我们可以用场方程描述海洋中的温度标量场及流速矢量场。这种情况下的场方程极为复杂，因为这些场彼此可以相互影响——标量场可以影响矢量场（海洋中不同点的温度差可以影响洋流速度），反之亦然。当遇到这些复杂的情况时，人们可以用计算机进行场方程的求解。但事实上这些场方程的形式 19 世纪的经典物理学家就已经知道了。

在以上的两个关于海洋中温度与流速的例子中，场的传播必须要有一个介质（在这两个例子中，海洋就是介质）。另外的关于场的例子中，比如气体压强或弦中的张力，也是需要传播介质存在的（分别是气体与弦）。这些场必须要用一些物理实体的性质来定义。那么对于电磁场是否也是如此呢，电磁场的传播介质是什么呢？爱因斯坦在其发展狭义相对论的过程中发现，电磁场的传播并不依赖于介质。电磁场可以在介质中传播——比如光可以穿过玻璃——但是电磁场的传播却不一定非得有介质的存在。在某种意义上，电磁场具有基本性：我们不能通过其他的事物定义电磁场。在下面两章中，我们也会遇到一些具有相同性质的场。我们不能够用其他实体的性质解释这

些场。基本场是我们所知道的最简单的事物，它们不能约化——没有“部分”，不能用其他的材料构成。当我们像理查德·费曼和史蒂文·温伯格一样追问“为什么”时，我们要寻求的是用场的动力学解释其他的物理实体。关于基本物理的研究就是关于基本场的研究。

在物理学家们了解宇宙的量子性质的很多年以前，詹姆斯·克拉克·麦克斯韦（James Clerk Maxwell）就已经将电磁场的概念引入到物理学中了（当然，麦克斯韦的理论属于经典物理部分）。在20世纪30~40年代，物理学家们已经掌握了使电磁场遵守量子理论的分立性的办法。同样的方法也可以用于其他基本场的量子化。当场同时也满足洛伦兹对称性时——换句话说，就是量子力学与狭义相对论联姻时——其结果就是相对论性量子场论。

量子场论（一般略去“相对论性”）使我们有了些很重要的见解。例如，与每个基本场相伴的是一个量子粒子：场用粒子的性质表现出自身。所以电子是所谓的狄拉克场量子粒子表现形式，光子是电磁场的量子粒子表现形式等。量子场论一个令人吃惊的结论是粒子数不守恒。这就意味着，只要满足了特定过程所必须遵守的包括能量守恒在内的各种守恒律，光子和电子之类的粒子就可以“无中生有”。在现代粒子物理实验中，这样的粒子产生是再平常不过的现象。可是在经典理论中粒子产生是不可思议的，我们必须要用量子力学来解释这样的事情。

另一个具有震撼性的结论是由英国物理学家保罗·狄拉克（Paul Dirac）于1928年首先发现的：每一个基本的量子粒子



必有其对应的反粒子。粒子及其反粒子有相同的质量，但却有彼此“镜像反转”的性质。比如，带有负电荷的电子就有带有正电荷的正电子作为其反粒子（零电荷零质量的光子自己是自己的反粒子）。量子粒子与其反粒子相互作用时就会彼此湮灭。例如，电子与正电子相互作用就会湮灭成光子。在这样的过程中所释放出来的能量可能极为巨大，因为爱因斯坦方程 $E=mc^2$ 中的系数 c^2 实在是太大了。（尽管粒子加速器中产生反物质很平常，但我们生活的这个世界却全部是由物质而不是反物质组成的。物理定律并不要求正物质的数量要多于反物质的数量，所以，宇宙中反物质的缺乏是摆在物理学家和天体物理学家面前的一个神秘且影响深远的重大问题。）

量子场论的另一个非凡结论是：单独的狄拉克方程可以描述很多的电子——这就意味着所有的电子是精确全同的。在量子世界中，如果你看到了一个电子，你就看到了所有的电子。这一结论对于其他基本粒子也成立。这显然和经典物理中的情形是不同的，经典物理中，我们可以为粒子贴上标签分辨彼此。这样的情形就导致了以经典物理的眼光来看完全无法理解的现象（见图 17）。

46

后面我们会详细地讨论这些内容。这里关键的是这样的两个事实：第一点，宇宙具有与生俱来的量子性质；在我们的日常生活中感受不到量子效应则完全是因为普朗克常数太小了，我们的叙述将不可避免地很快遇到量子力学。第二点，所有科学中最成功的理论——比所有其他的理论更能经受得起实验检验的理论——是相对论性量子场论。



图 17 量子粒子在很多方面都与经典粒子不同。例如，精确全同的粒子的完全一致性会导致很多有趣的现象。如图所示：左边的图是两个经典粒子的碰撞过程，我们可以为它们分别贴上标签，因而就可以在整个碰撞过程中跟踪它们的轨迹；右边的图是两个量子粒子的碰撞，不确定原理使得其轨迹模糊，当两个粒子彼此接近时，波函数的叠加使我们不能分辨出两个粒子，我们不知道哪个粒子是 A 探测器探测到的，哪个是 B 探测器探测到的

广义相对论遭遇量子力学：小尺度上的大麻烦

上帝并不掷骰子。

阿尔伯特·爱因斯坦

物理学的两大支柱——广义相对论与量子力学——各有其自己的领地。我们用广义相对论描述大尺度上的物体行为；用量子力学描述小尺度上的物体行为。也许我们会想，既然两者在不同的情形下起作用，也许我们就是生活在两个基本理论之中呢——这显然是毫无意义的想法。

从美学的角度看，自然界有两种不同的基本理论绝对是一个糟糕的想法，当然，这并不仅仅是个美学问题。如果某些基



本的相互作用属于经典范畴，则我们可以仅利用这些相互作用得到一个粒子的位置和动量——从而破坏不确定原理。如果一些基本的自然法则是属于量子范畴的，则所有的基本自然法则都必须是属于量子范畴的。除此之外，还有一些情形，比如靠近黑洞的奇点处，大爆炸之后的最初时刻——对所有这些时空在小尺度高度卷曲的情形，我们都必须同时用到广义相对论和量子力学这两种理论才能正确地研究其中发生了什么。不论从实践还是美学的角度来看，我们都必须只有一个基本的物理理论。那么我们是否能够将广义相对论与量子力学合而为一呢？我们是否能够写出引力的量子场理论？遗憾的是，所有这样的尝试至今都未获成功。

47 广义相对论是一种经典场论。电磁场也曾只是一种经典场论，但是人们学会了如何量子化电磁场。一步步的努力之后，物理学家们最终取得了非凡成功的电磁场相对论性量子场论。正如我们总在日常生活所做的那样，物理学的首要原则是：某些东西要是能起作用，就复制它。因而物理学家们自然地就按照与量子化电磁场相同的办法量子化引力场，事实上，物理学家们的确能够完整地表述引力的量子理论。如同电磁场中的情形——电磁场有光子作为其量子——引力场也有一个引力子作为引力场的量子。在这种图景下，引力相互作用通过交换引力子起作用，正如电磁场是通过交换光子起作用。人们可以计算含有引力子的物理过程的结果，就像计算光子的作用效果那样。但是这些计算结果却趋向于无穷大。量子理论中任何计算的结果只能是概率——特定事件发生的可能性，换句话说，计算结果只能在 0（特定事件肯定不发生）与 1（特定事件必定

发生)之间。那么无限大的概率对我们有什么用呢?事实上,毫无用处。无限大概率的出现确定地意味着理论是有问题的。50年来,这个地球上最聪明的一些头脑一次又一次地冲击量子引力理论中的无限大问题。目前为止,还没有人能够消除理论中的无限大,这类方法看起来已经是穷途末路了。

为什么在经典电磁场的量子化中取得了巨大成功的方法在量子化引力理论时会遭遇如此惨重的失败呢?最主要的原因在于广义相对论的核心假设是时空具有平坦的几何性质。在大尺度时,这一假设自然没有问题;但是当我们的探索转向微观尺度时,假设就将遭遇不确定原理而崩溃。不确定原理告诉我们量子起伏会在引力场中引起波动——即使是在空宇宙的引力场中也是如此。当我们的探索尺度变得越来越小时,不确定原理告诉我们,量子起伏也变得越来越来大。在普朗克长度—— 10^{-35} 米,时空变得扭曲,躁动不安。我们熟悉的时空概念——“这里”、“那里”、“那时”、“现在”等——全部失去了其本来的意义。所以,在普朗克尺度时广义相对论的失败实际上是广义相对论所依赖的假设(即平坦空间几何)的失效。在普朗克长度,广义相对论方程不再成立,理论的崩溃通过计算结果的无限大表现出来。

早在爱因斯坦之前,物理学家们就已经开始尝试统一引力与其他几种力,但进展缓慢。既然没什么进展,物理学家们便转而探寻微观世界的量子力学或宏观世界的广义相对论,把统一的任务留待以后完成。这种洒脱的态度使得我们有机会更加深刻地理解自然。最终,尽管只是一些征兆——那试探性的一瞥——但统一还是很有可能的。对于将要前往欣赏这些丰富进



FIRST MOVER

第一推动

展的读者们，我们还是像物理学家们一样，将物理学的这两大支柱分开欣赏吧。在接下来的几章中，我们将继续近距离地观赏微观世界——用相对论性量子场论精确描述的世界。

第三章 | 构建宇宙的基块

49

这是人类历史中最执着最伟大的冒险——试图追寻这个宇宙如何运行，从哪里来。

穆雷·盖尔曼 (Murray Gell-mann)

我们生活的这个世界，尽管它看起来纷繁复杂，但是人们一直都在怀疑：也许这种复杂性来源于很有限的几种基块的相互作用。比如，古希腊人就认为自然界是由四种基本元素——火、土、空气和水——构成的。现在，我们已经知道自然界中有 92 种自然生成的化学元素；它们从最轻的氢一直排到最重的铀。我们日常生活中所见到的所有事物都是这 92 种元素一种或几种的组合。根本上讲，科学家们区分元素的根据是其组成原子数的不同；氢原子与铀原子的原子数就不同。当科学家们认识到原子并不是不可分割的，而是有结构的的时候，这种原子分类方法的根源也就搞清楚了。原子是由原子核及围绕在其外的电子组成的，原子核也有结构：原子核是由一个或几个质子及一些中子组成的。（可以根据一个原子中质子的数目区分

50



原子；相同元素的不同同位素其原子核包含相同的质子数目和不同的中子数。最简单的氢原子只有一个单个质子构成的原子核及绕核运动的一个电子；铀元素最常见的同位素是由 92 个核外电子和原子核构成，其原子核中有 92 个质子及 146 个中子。）后来，科学家们发现即使是质子和中子自身也是有结构的：它们由紧紧绑在一起的三个夸克组成。

元素，原子，原子核，质子，夸克——每次我们更深入地探寻物质的基本结构时，都会发现物质有更深层次的结构（图 18）。不过也有迹象表明我们已经揭开了基本粒子——构建宇宙中所有物质的基块——的真的面纱。在我们了解我们究竟是怎样触到根基之前，还是让我们先来了解一下基本粒子究竟是如何产生出来的。

基本粒子的产生

神奇的事物呀——即使那最小的粒子。

沃尔特·惠特曼 (Walt Whitman),

《夕阳之歌》(Song at Sunset)

电子和光子是我们最熟悉的基本粒子。我们可以从大量熟悉的事物中轻松地找出它。电子是原子的关键组成部分，普通的物质中有大量的电子存在。因此只需要很少的能量就可以将电子分离出来。加热一块铁板，电子就会被“蒸发”出来。电子产生后，我们可以利用电磁场来控制电子。光子的产生则更加简单了：只要有点能看清手表的光亮就足以产生大量的光

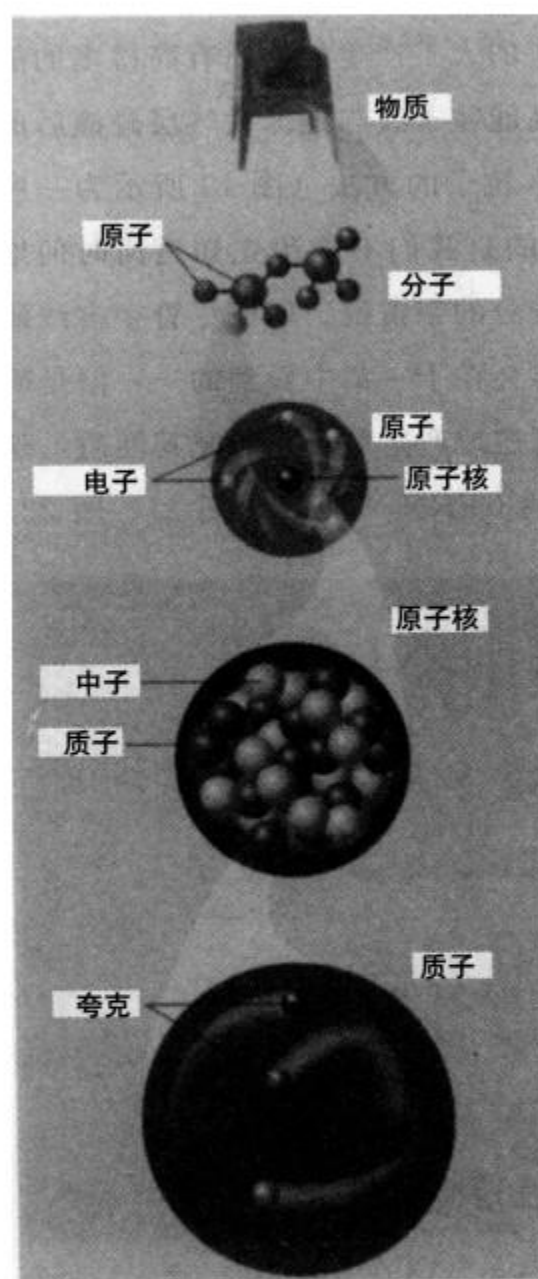


图 18 试图发现物质最终组成的过程就像剥洋葱一样。我们知道日常生活中见到的每样东西——比如头发的构成物质——都是由分子组成的；而分子是由原子组成的；原子又有内部结构，原子核及环绕在其外的电子云；原子核又有内部结构，质子和中子组成了原子核；质子和中子也是复合结构，三个夸克构成了它们。到此为止，可以将电子和夸克看成是类点，无结构的粒子了，人们普遍相信它们就是基本粒子了。但是，很多理论家们认为，有理由相信它们是由更基本的某种东西——弦——构成的

子。令人遗憾的是，要产生其他的基本粒子则需要很高的能量。而且，问题的关键并不在于需要有很高的能量，而在于这样的高能量要集中在一个很小的区域，要比质子还小的区域。

宇宙线——来自外层空间并持续不断地穿过大气层的高能



粒子束——在很小的空间聚集了很高能量的粒子。这些自然产生的物质具有比我们所能期望的人工产生的物质有高得多的能量，所以，仔细地研究这些高能粒子线与地球大气层碰撞后的残片就是一种很好的寻找基本粒子的方法（图 19 所示为一座典型的宇宙线探测器）。不幸的是我们不能预先知道何时何地将会飞来一束多大能量何种成分的宇宙线。所以尽管宇宙线研究有很大的价值——如我们将会在下章中看到的——但是确实很难掌控这种观测。要想可控地产生粒子并研究其性质，建造粒子加速器——比如欧洲的 CERN（图 20、图 21、图 22）

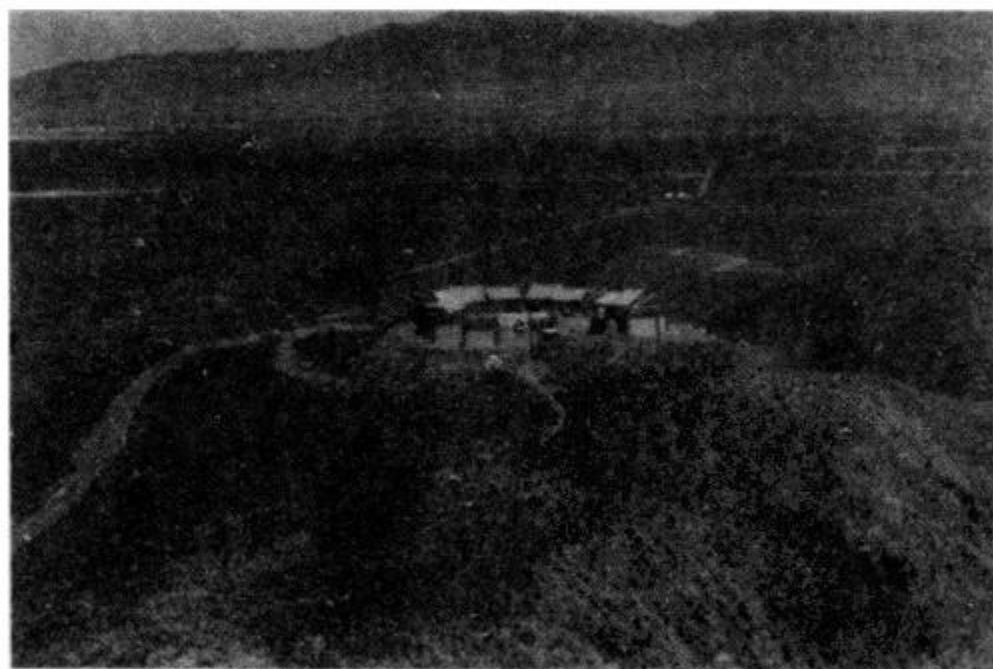


图 19 坐落于犹他州的杜格威（Dugway）实验基地的 HiRes2 空瞰图。该实验室探寻的是 3 万立方千米的大气空间的宇宙线。原初宇宙线的能量可以达到 1 亿 TeV。这样的高能宇宙线进入大气层时的相互作用可以产生高达百亿个的带电粒子雨，这些二级粒子激发大气中的氮气，从而放出紫外线。灵敏的探测器即可以测到夜晚天空背景下的紫外线

和美国的费米实验室（图 23）的那些大型加速器——才是最好的办法。

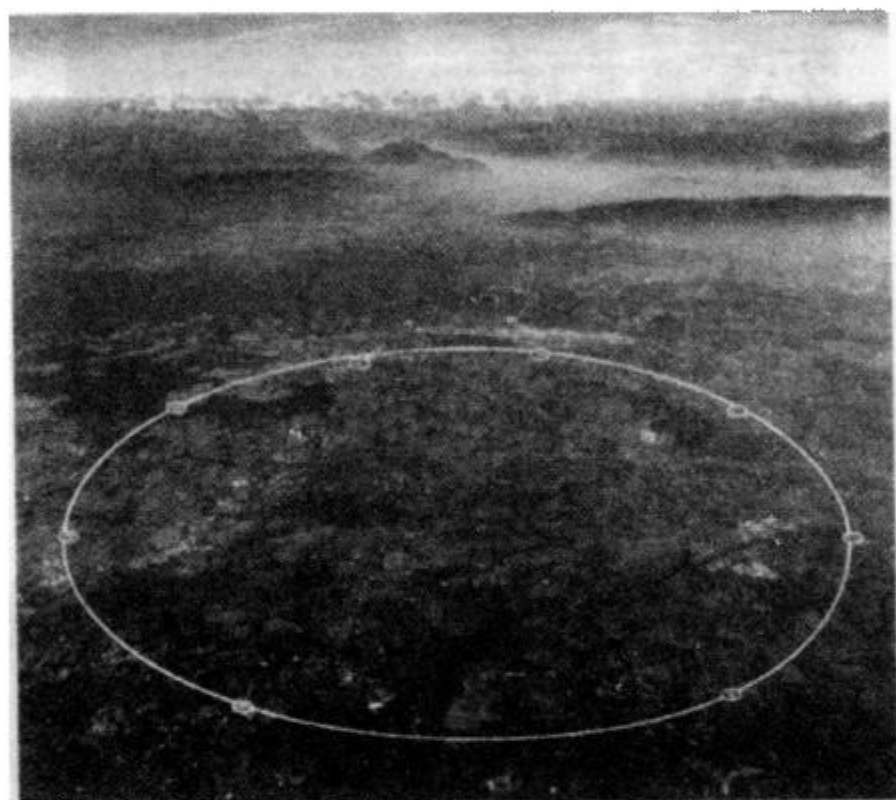


图 20 将于 2007 年运行的大型强子对撞机 (LHC)。LHC 使用的是现有的加速器隧道（在陆地背景中用白线画出的圆圈）。隧道长 27 千米，深埋于地下 100 米处。坐落于日内瓦湖与侏罗 (Jura) 山脉附近

基本粒子的能量单位

原子物理学家研究原子结构时发现普通的物理单位——比如质量单位克或能量单位焦耳等——并不适于讨论电子的性质。于是原子物理学家们引入一种新的单位——电子伏（符号



FIRST MOVER

第一推动

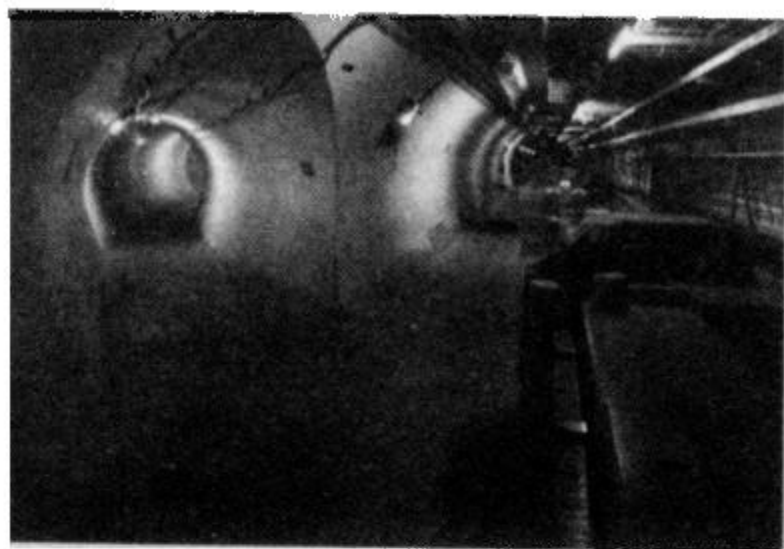


图 21 侏罗山脉下的一条 CERN 隧道

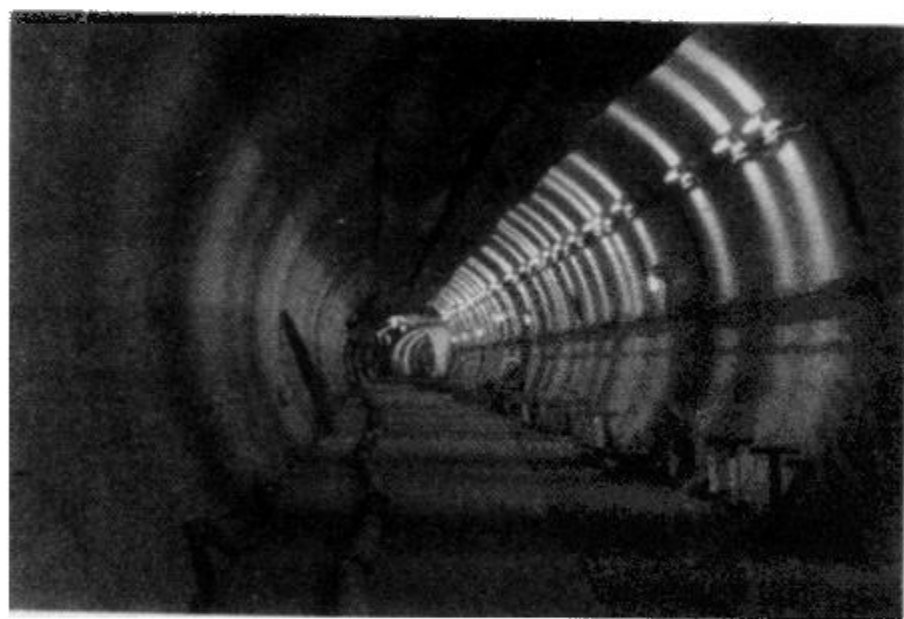


图 22 大型强子对撞机直接推动了包括计算技术、超导与电子学等在内的很多技术向极限发展。LHC 开动后，质子的碰撞能量将达到 14 TeV；铅核的碰撞能量高达 1150 TeV。四个大的探测器 ALICE、ATLAS、CMS 及 LHCb 将记录超过万亿个粒子的碰撞结果；运行期间，ATLAS 和 CMS 的记录速度相当于每秒记录一部大不列颠百科全书

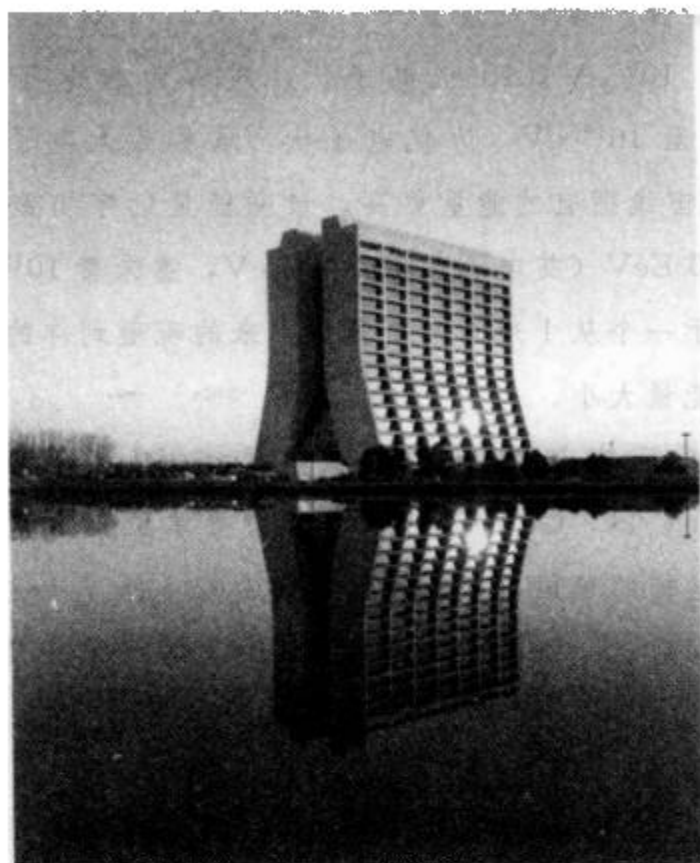


图 23 日落时分倒映于天鹅湖 (Swan Lake) 水中的威尔逊大楼，设计灵感来自于法国博韦 (Beauvais) 的一座哥特式教堂。这座坐落于伊利诺伊州的巴达维亚 (Batavia) 的建筑是费米实验室的管理及科学活动的中枢。周长 4 千米的 Tevatron 加速器是费米实验室的物理实验中心。在本书写作时，它是世界上能量最高的加速器。三种基本粒子最先在这座实验室被观测到，它们分别是底夸克、顶夸克及 τ 子中微子

eV) ——其定义为在电势差为 1V 的电场中移动一个电子所需要做的功。电子伏是一个很小的能量单位，1 电子伏大概是单个光子所具有的能量。

粒子物理学家们的实验中要用到远比原子物理学家们的实



验更高的能量。典型的能量大小是 10^6 eV (100 万电子伏符号为 MeV), 10^9 eV (10 亿电子伏, 或称为吉电子伏, 符号 GeV), 甚至 10^{12} eV (万亿电子伏, 或称为太电子伏, 符号 TeV)。宇宙线拥有的能量更高。最高能量的宇宙线其能量可能高达 320 EeV (艾电子伏, 符号 EeV, 意味着 10^{18} eV); 这大约相当于一个从 1 米高的位置掉下来的碗砸到你的脚趾时你感受到的能量大小。

根据爱因斯坦的著名公式, $E = mc^2$, 我们可以用, eV/ c^2 , MeV/ c^2 , GeV/ c^2 等来作为质量单位。物理学家们使用的就是这样的单位, 只不过他们通常省略掉 c^2 , 这种省略已经形成一种默认。所以, 你有时会读到类似于质子质量为 938 MeV 或 Z 玻色子的质量为 92.6 GeV 这样的写法。本书将采用这样的表达。

~~~~~

我们首先用带电物质——如质子或电子来讨论粒子加速器。带电粒子在大功率的电磁场中被加速到很高的能量并被束缚在很窄的束中。在诸如 SLAC (斯坦福直线加速器) 之类的直线加速器中, 带电粒子沿直线加速; 而在诸如 CERN 的大型强子对撞机或费米实验室的 Tevatron 之类的环形加速器中, 电磁场将带电粒子束缚于一个环形或螺旋轨道中加速。将加速后的粒子撞向精心准备好的靶子; 或将两束加速后的粒子正面直接相撞, 通过特别的探测器来研究碰撞后的产物。在对撞机中会产生无数种不同的粒子, 需要通过研究来记录并了解这些物质的性质。通过对这些亚原子物质的细致研究, 科学家们得以获悉哪些是真正的基本粒子, 哪些只是复合粒子。例如, 人



们以前一直认为质子是基本粒子，但现在我们知道质子是由更基本的实体组成的。

这些内容说起来很容易，但实际的操作却极为复杂。比如一个常见的实验是将质子（我们稍后会知道，它由三个夸克组成）与反质子（由三个反夸克组成）碰撞，希望从碰撞产物中找到从一个反夸克上弹回的夸克。这就好比让两个以超声速运动的橙子彼此碰撞，然后在乱七八糟的一团中，找出从一个籽上弹回的另一个籽。记录并识别有意义的粒子是对实验技术的巨大挑战，这种挑战促使实验技术不断逼近极限（图 24）。当你了解到在这些对撞机中所需要的实验的高精确性，你也许会

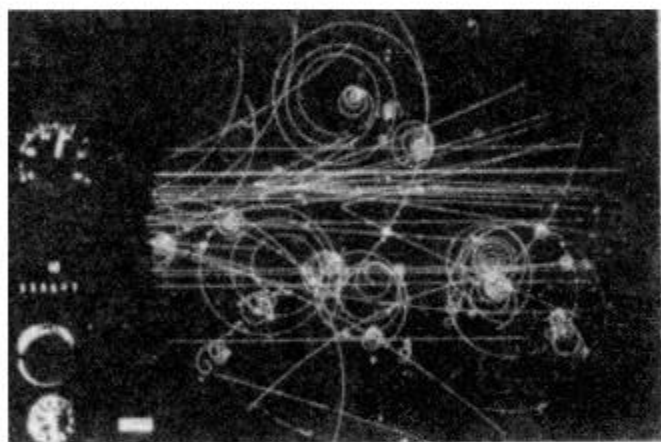


图 24 我们需要探测粒子在加速器上产生后的轨迹。直到 20 世纪 70 年代人们仍然使用气泡室探测粒子。气泡室是一个充满濒临沸点的液体的容器；带电粒子穿过气泡室时会产生一串气泡——由于沸腾——从而显示出粒子的轨迹。对气泡拍照及分析可以得到有关粒子的信息。这是一张 CERN 的粒子喷柱的照片，图中的每一条轨迹意味着一个在电磁场中螺旋运动的短寿命带电粒子。这张照片大约摄于 20 世纪 70 年代。气泡探测法已经被更现代的——尽管美学享受减少了——粒子探测方法取代了



认为这简直是不可能的挑战。CERN 的一些实验极其准确，以至于物理学家们甚至不得不将月球的影响考虑进去（月球绕地球运动时引力的变化会对粒子束能量有一个可测量的影响）。甚至火车时刻表也是他们需要考虑的内容（从日内瓦到巴黎的火车也会对粒子束能量有影响）。

54

粒子加速器结构巨大，其尺寸和复杂性令很多工业工厂相形见绌。其中最大的实验简直可以称为“巨硕科学”。将亚原子粒子加速到高能需要巨大的建筑。碰撞的能量越高，所需要的经费及实验的复杂性也就会越高——但是我们有很多理由支持这样高能量区域的实验（图 25）。最重要的理由与所能给出的结论有关。我们用加速器探索短距离（为了发现物质是否有更小的结构，如果有，它是什么样的）。换句话说，加速器是大型显微镜。简单地说，显微镜只能观测到可与所用波长相比拟的距离。光学显微镜中这种波长就是光的波长；而在粒子加速器中，这种波长是相关粒子的量子波长，也就是粒子动量的倒数。所以，如果一个加速器传递的动量越大，相应的量子波长就越短，我们所能得到的结论就越好。这意味着我们需要越来越高的能量。

55

不确定原理可以告诉我们从一台加速器上得到的结果大致是什么程度的。例如，一台加速器的粒子束能传递 10 GeV 的动量的话，我们就可以获悉长度为  $10^{-16}$  米大小的空间的情况：我们的“显微镜”此时能看到比质子半径还小的距离。（20 世纪 30 年代的加速器能达到 1 MeV 的能量，到 50 年代 1 GeV 的能量也被突破了。所以早期实验粒子学家们所能达到的尺度非常有限，结论都是很粗浅的，在这些早年实验中，质

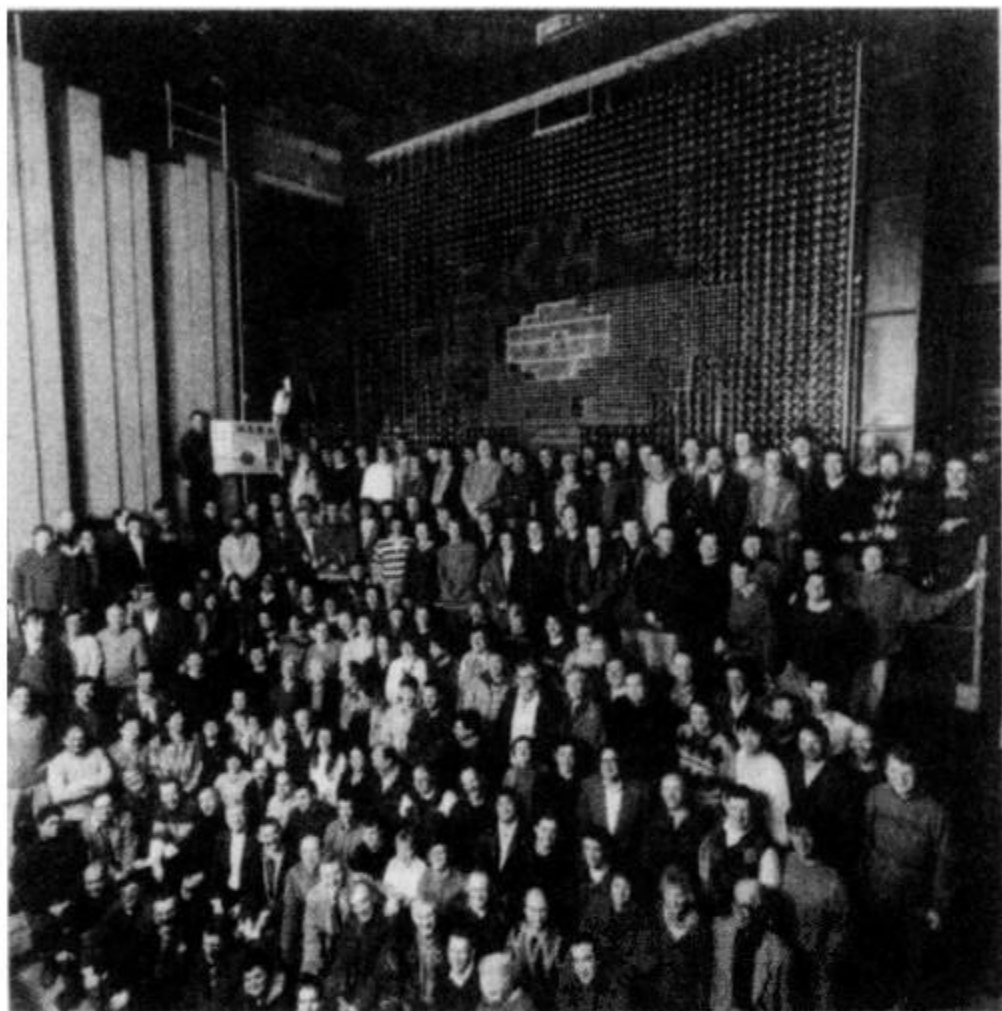


图 25 现代粒子物理实验的特点是具有高度复杂性和高耗费，一个国家很难独立完成一项如此巨大的工程。大的国际合作组从加速器和探测器的设计建造直至最后的运行全部包揽。这张照片是来自汉堡的 DESY 实验室的 HERA-B 组的科学家们的合影。该实验组做的是 B（一种称为 B 介子的亚原子粒子）物理的相关实验。总共有来自 13 个国家 33 个研究机构的近 250 名科学家在 HERA-B 组工作。但这并不是说该组是最大的粒子物理实验组



子看起来就是一个点粒子了，因此当时质子被认为是基本粒子中的一种。)

56

图 26 是长度与能量的对应关系。目前 CERN 和费米实验室的高能实验能探索的距离是  $10^{-18}$  米。在以下几章中我们将会看到，基本粒子的现有理论在这个尺度上是很成功的。本书

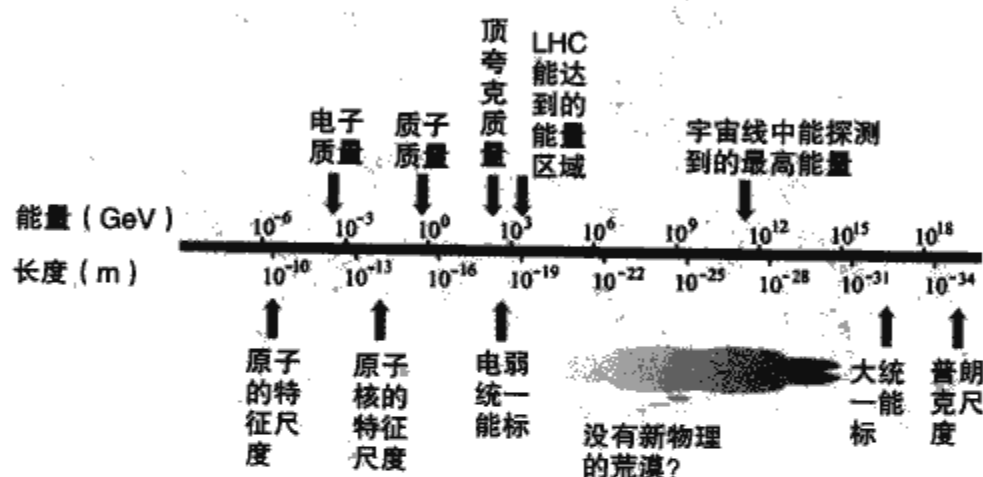


图 26 当人类的研究领域扩展到越来越高的能量时，所研究的尺度也就越来越小。在第四章中我们将会看到，目前的基本理论直到 200 GeV 的能量（相当于  $10^{-18}$  米）时仍然很好地符合实验。更高能量、更小尺度时必然会有新的物理发现。按现有理论，直到  $10^{17}$  GeV 都没有物理新发现。一些最新的想法提出有趣的新发现会在  $10^3$  GeV 处出现。而这个能量区域是 CERN 的大型强子对撞机即将探索的能量区域。终极的目标是描述普朗克尺度—— $10^{19}$  GeV（约为  $10^{-35}$  米）——的物理

57

中将要讨论到的很多“疯狂”的想法都是关于高能物理的，换句话说，即是极小距离——普朗克尺度的物理。虽然我们永远也不能拥有一台能探索普朗克长度（ $10^{-35}$  米）的物理加速器，但好在这并不意味着不能检验那些想法。天文学断言宇宙起始

于一次奇异事件，即大爆炸。宇宙开始于极小尺度，大爆炸之后极短时间内粒子拥有极高能量。我们将要讨论的那些疯狂想法，要是它们正确的话，那么它们就会对宇宙的早期历史有影响。于是我们就可以通过对宇宙学的研究发现宇宙处于与今天完全不同的状态时的蛛丝马迹，从而获得检验这些激进想法的途径。我们也会在第十一章中讨论利用我们拥有的加速器检验新物理的可能性。

## 网络与网格

58

或许并不令人惊讶——至少物理学家们并不惊讶——万维网（www）最早是在 CERN 发明的。20 世纪 80 年代末，CERN 的研究组所产生的数量巨大的信息提出了要有一种用户界面友好的系统的需要。结果，一位英国的计算机科学家蒂姆·贝纳斯-李（Tim Berners-Lee）编写了超文本传输协议（http），互联网上的计算机交换超文本文件所使用的语言；并且设计了互联网上赋予文件地址的方案。这位科学家同时发明了可用于接受和查看超文本文件的浏览器。

CERN 的下一代粒子对撞机——大型强子对撞机（LHC）——将于 2007 年启动。数以万亿计的粒子碰撞事件产生每年将生成  $10^7$  G 字节的数据量（相当于 2000 万张 CD 刻录光盘的容量）。这雪崩般的数据量需要难以想象的计算能力。这就是现在 CERN 的科学家们用网格从事计算的原因。网格计算是一种新的计算方法，就像人们利用电网一样：人们接通电网获得电能，现在科学家们将计算机置于网格之中获得更强



的计算能力。在这样的网格计算中，科学家们会得到比所能拥有的单一计算机强大很多的计算能力。正如网络一样，网格计算最先提供给大学和科研机构。但同样也如网络一样，网格很快就会向公众推广。即将到来的网格应用也许会再次改变我们的世界。

## 为基本粒子分类

我们为知识命名，就连那被忽略的最小部分我们也要妥善安排并归类。

安布鲁斯·毕尔斯 (Ambrose Bierce),  
《魔鬼字典》(*The Devil's Dictionary*)

很多年来，粒子对撞机上产生了数以万亿计的事例。对这样大量的事例进行分析研究（除直接计算外）之所以变得可能，完全是因为我们的老朋友——对称性。只有在对称性的帮助下我们才能搞清楚粒子碰撞的结果的意义：我们需要守恒律来解释在实验室中观测到的事例。如我们之前所知道的那样，量子场所具有的外部时空对称性导致能量、动量、角动量守恒。记录下来的所有粒子碰撞事例都满足这些定律。如果某个特殊过程被守恒律所禁戒，则它永远也不会发生；相反，如果某个过程是守恒律所允许的，则最终（也许会费很大劲）我们会观测到这个过程。

对称性在另外一些方面也很重要。稍后我们会看到。场具

有一些“内禀”对称性，这些对称性会产生“荷”。荷严格守恒；而且，荷不仅仅整体守恒，在不同的时空点也满足局域守恒。电荷是我们最熟悉的荷，在任意一次粒子碰撞过程前后，净电荷必定相等。对于其他类型的荷也是如此。对称性将帮助我们在纷繁复杂的迷宫中找到出路。

最后，对称性在我们为基本粒子分类时也扮演着重要角色。

最早利用对称性为基本场分类的是尤金·魏格纳(Eugene Wigner, 图 27)。1939 年，魏格纳发现了令量子场方程满足洛伦兹不变性——即要求方程满足狭义相对论——时的性质。他证明了要求方程在各种变换下具有不变性会导致场的量子具有一定的性质——诸如质量、电荷、自旋等——而不受不确定原理制约。这些性质顺理成章地成为为场及粒子分类的根据。

### 静止质量

魏格纳分类方案中很重要的理论是所有的量子粒子都有确定的或正或零的静止质量，正的静止质量就是当粒子处于与你相对静止时你所测到的质量（如果粒子具有非零的静止质量，那么你就可以与其保持相对静止——至少在理论上如此——然后测得它的质量）；质量为零的粒子以光速运动，因而永远不能与你保持相对静止。光子——电磁场量子——质量为零，以光速运动。

总之，量子粒子要么没有质量，要么有正的静止质量。



图 27 尤金·魏格纳按对称性原理对基本场进行分类。由于这项工作及其他一些量子力学方面的贡献，他于 1963 年被授予诺贝尔物理学奖

## 电 荷

狄拉克场有一种称为相位的性质。你可以将相位当成是在半径为 1 的圆中，起始于圆心终止于圆周的箭头（图 28）。当我们将相位的零点取成任何值——箭头取任何方向时——物理结果并不受到影响。（这种情况类似于大家熟知的重力的情况，比如当你把这本书拿起垂直升高 12 厘米时你所需要的能量与



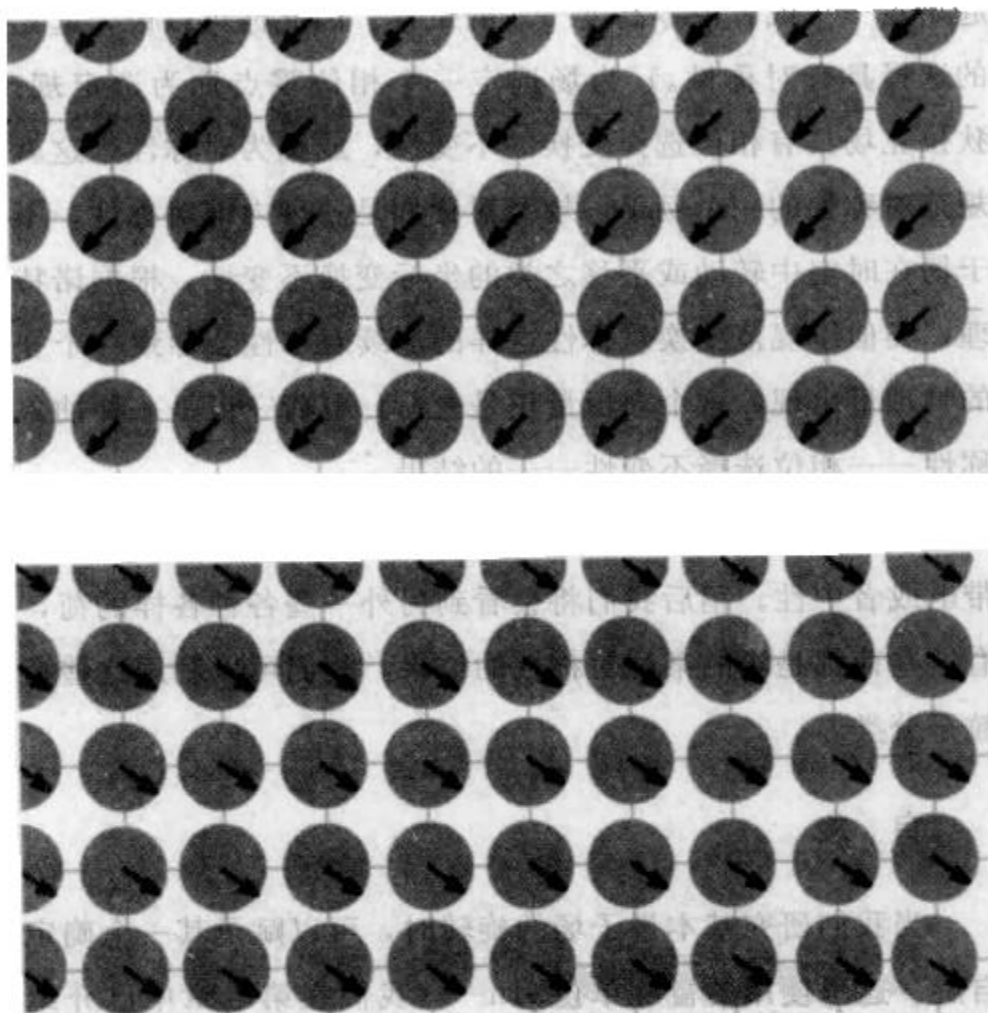


图 28 狄拉克场有一种被称为相位的性质。在这张图中，我们用  
一个起始于半径为 1 的圆的圆心而终止于圆周的箭头来代表相位。我们  
可以自由地选取箭头方向；也就是说，我们可以自由地选取规范。在上  
边的图中，箭头指向左下；下边的图中，箭头指向右下。在这种变换下  
自然界不发生改变；这两种情形没有可观测到的分别。我们将这种对称  
性称为整体对称性，这是因为变换对于时空中的所有点都是一样的。根  
据诺特定理，狄拉克场的相位变换不变性导致电荷守恒

你究竟是从哪个位置开始升高无关，不管你是从地下室还是房  
顶开始都无所谓。所需要的能量仅与高度差有关，而不取决于



起始点——或者说零高度——的位置。因此你可以说，起始点的选择具有对称性。) 为场选定一个相位零点称为选定规范。狄拉克场具有相位选择变换的不变性，或称为对称性。这就是规范对称性的一个例子。规范对称性是一种内部对称性，不同于场在时空中转动或平移之类的坐标变换不变性。根据诺特定理，类似于规范变换对称性这样的连续对称性会导致一个守恒的物理量出现，这个守恒量正是电荷！电荷守恒是一种抽象对称性——相位选择不变性——的结果。

电荷为我们提供了另外一种为粒子分类的方式：粒子或者带电或者中性。稍后我们将会看到另外一些各种各样的荷，所有这些荷都是场的某种对称性的结果。我们可以利用这些荷为粒子分类。

## 自 旋

当我们研究基本量子场的旋转时，可以赋予其一个确定的自旋。这里使用的自旋单位为 $\hbar$ ——我们在第二章中已介绍过的一个常数，统治着量子现象——狄拉克场的自旋为 $1/2$ ，因此相伴的粒子即电子的自旋就是 $1/2$ ；电磁场的自旋为 $1$ ，因此相伴的粒子即光子的自旋就是 $1$ 。

自旋的值是固定的，旋转的飞轮会逐渐减速直至停止，但是粒子的自旋永远也不会减速；你可以把你的陀螺抽得飞快，可是你永远也不能加快粒子的自旋。粒子的自旋出自其固有性质。(我们可以将粒子的自旋想象成陀螺的绕轴旋转，虽然这种类比并不理想，量子世界永远都不能用日常生活所见所闻的物体完美地勾画出来。)

魏格纳证明量子粒子的自旋必须取整数（自旋为 0, 1, 2, ...）或半整数（自旋为  $1/2$ ,  $3/2$ ,  $5/2$ , ...）。粒子的自旋决不可能为诸如  $1/3$  这样的值（至少当狭义相对论还正确时是不行的）。自旋为整数的粒子称为玻色子——为纪念和爱因斯坦一起探寻量子力学精义的印度物理学家萨地扬德拉·玻色（Satyendra Bose）。自旋为半整数的粒子称为费米子——为纪念诺贝尔奖获得者意大利裔美国物理学家恩里克·费米（Enrico Fermi）。粒子的自旋值是另一种我们可据其为量子粒子分类的物理量。所有的粒子要么是玻色子要么是费米子。

按粒子整数还是半整数自旋为粒子分类看起来相当简单，但是不同对称性质的粒子（见补充性文字“费米子和玻色子”）却具有截然不同的量子现象。例如，费米子有不相容原理：全同费米子占据相同的量子态是禁戒的。元素周期表的存在——根本上讲就是我们世界化学性质——取决于遵从不相容原理的费米子的性质。如果没有不相容原理，则物质原子的所有电子都会占据最低能量的量子态，而实际并不是这样。另一方面，玻色子却没有这样的不相容原理。玻色子截然不同的性质可以用激光现象来说明。在老式的那种咋咋呼呼的动作电影中，一个强盗挥刀砍下时，另一个家伙必定挺剑架住。剑是由遵循不相容原理的费米子组成的材料铸成的，因此不能穿透彼此，不相容原理不允许剑中的费米子处于同时同地。在电影“星球大战”中，卢克与达斯·维德激光剑相抵，这是与物理定律矛盾的。激光剑（要是有的话）是光束构成，而光子并没有不相容原理，所以两把激光剑只能穿过彼此，不能抵住。光束会直接穿过另一道光束，不会像电影中那样。物质与辐射——费米子



与玻色子——有完全不同的规则，我们的世界之所以看起来是现在这样，就是因为费米子与玻色子这些性质上不同的粒子的存在。

63

## 费米子与玻色子

费米子与玻色子的区别与对称性相关，这种区别富有极为深刻的内涵。考虑分别位于位置 1 和 2 的两个基本粒子。这个双粒子系统可以用一个量子波函数描述（还记得波函数吗？它可以告诉我们关于一个量子系统我们所能知道的一切）。假设这些粒子具有相同的量子数：相同方向的自旋，相同的质量，相同的电荷；由于这两个粒子的量子数一样，故而它们是全同粒子。要是我们交换了 1 和 2 这两个粒子呢？我们就会得到一个新的波函数。但是这个可观测系统一定不发生改变；我们不能区分交换前的系统与交换后的系统，因为两个粒子是全同的。如果我们能够观测到某种区别，那就意味着这两个粒子不是全同的。交换系统中的两个粒子，系统具有不变性，这就是交换对称性。

量子力学中，观测到一个系统处于某种特别的态的概率为波函数的平方。在上面的例子中，交换前后两个波函数的平方必须一样。令波函数满足这种限制共有两种办法：要么交换前后的两个波函数完全一样，要么彼此相差一个负号。即是说，基本粒子的不可区分性意味着：在位置交换变换下，波函数要么是偶函数（交换前后波函数一样），要么是奇函数（交换前后波函数相差一个负号）。这样的事实导致费米子系统波函数是全同粒子交换的奇函数，而玻色子系统波函数是全同粒子交

换的偶函数。

假设我们在同时同地放上两个具有完全相同的量子数的费米子，这样的费米子系统波函数只有为零时，才能使得波函数是两个粒子交换变换的奇函数。这相当于说，在同时同地发现两个量子数完全一样的费米子的概率为零。全同费米子不能同时出现在同处，这正是不相容原理。随着两个费米子彼此接近，会有一个巨大的排斥力。这种排斥力并不是电磁相互作用的结果，因为对于不带电的中微子仍然有这种排斥力存在。这种排斥力的起源不是别的，正是对称性。

对于玻色子，则完全是另外一种情况。因为对于交换变换，波函数是偶函数，也就是说波函数完全不变，所以完全可以在同时同地放上两个玻色子。事实上，玻色子不但不会受到处于空间中相同点相同量子态的禁戒，更趋向于处于相同的量子态上。比如激光器，就是这个原理的产物。

除可测量粒子的自旋，我们也可以同时测量自旋在某个方向（通常取为  $z$  方向）上的分量。对于自旋为  $1/2$  的电子，自旋的  $z$  分量要么指向  $z$  轴的正方向（自旋“向上”），要么指向  $z$  轴的负方向（自旋“向下”）。自旋的方向可以被改变，我们可以用电磁场将电子从自旋向上的量子态变成自旋向下的量子态，反之亦然。

对于自旋为 1 的有质量粒子，有三种可能的自旋方向（+1, 0, -1）。光子是自旋为 1 的无质量粒子，这样的粒子只能有两个自旋取值：+1 或 -1。我们可以说光子有两种手性——左手性和右手性。（这在经典物理中是大家熟悉的理论。



经典电磁理论中，光是横向电磁波：电场与磁场彼此垂直，并且都与波的传播方向垂直。电场的方向的偏振描述，只有两种不同的态：垂直和水平。一般常见的光源如蜡烛火炬等，都是非偏振光，即是说电磁场可以在很多平面内振动。但是如果你有两个滤光片——比如两副偏光太阳镜的话，就可以很容易地发现，只有两种独立的偏振方向。将一副太阳镜水平放置，另一副垂直放置，你就会发现没有光能穿过这两副太阳镜。)

## 初探基本粒子

如果我能记得所有粒子的名字，我就是植物学家了。

恩里克·费米 (Enrico Fermi)

按照我们的分类方案，真正的基本粒子只有两种：费米子和玻色子。这两种粒子所扮演的角色将在第四章中讨论。这里我们只是初探一下对撞机上产生的粒子。简要的介绍就足以令人记住这些特别的基本粒子。

我们从费米子开始。

65

## 电 子

电子——实验首先发现的基本粒子——1879年由J·J·汤姆逊 (J. J. Thomson, 图 29) 发现，汤姆逊的发现在很多方面都标志着粒子物理学的诞生。

电子的性质众所周知。我们知道它的质量 ( $0.511 \text{ MeV}$ )，电荷 ( $-1$ )，自旋 ( $1/2$ ) 以及其他的量子性质。如同我们将

要讨论的其他基本粒子，人们从没有通过实验发现电子的内部结构。对我们来说，电子是一个点粒子。因而，一旦我们弄清电子的各种量子数，我们就可以说我们了解它了。

实验上，只用相对较少的能量就可以将电子从原子核外的电子轨道上剥离出来。电子被释放出来之后，人们就可以隔离、研究或操纵它了。可以说，整个电子工业都依赖于我们掌控电子的能力。



图 29 J·J·汤姆逊，  
1906 年的诺贝尔奖获得者

### 上夸克及下夸克

与从原子的外层轨道中分离出电子相比，将粒子从原子核（质子与中子）中分离出来需要更大的能量。这是因为作用于原子核中粒子的力要强于作用于电子的电磁力。在 20 世纪 40 年代到 60 年代，物理学家们发现了很多的通过强核力相互作用的亚原子粒子。这些粒子总称为强子（不参与强相互作用的粒子如电子，称之为轻子）。强子又可分为两种：自旋为半整数的重子及自旋为整数的介子。最初，人们以为如质子之类的重子以及如  $\pi$  子之类的介子全部是基本粒子。但是人们却不能搞清楚强子动物园中其他粒子——如  $\Lambda$ ， $\Sigma$ ， $\Xi$  等重子以及  $\rho$ ， $\omega$ ， $\varphi$  等介子所扮演的角色。

迷雾在 1964 年的时候才渐渐散去，美国理论物理学家穆



雷·盖尔曼 (图 30) 以及乔治·茨维格 (George Zweig) 分别独立地为理论物理引入了夸克模型。基本想法很直接: 重子及轻子都是由夸克组成的。夸克才是真正的基本粒子, 通过各种组合, 夸克构成已知的强子。为了解释在 1964 年时已知的大多数强子, 引入了两种不同类型的夸克: 上夸克 ( $u$ ), 下夸克 ( $d$ )。

66

### 强子的夸克模型

每一个重子都由三个夸克组成 (每一个反重子都由三个反夸克组成); 每一个介子都由一对正反夸克组成, 简洁优美。

人们熟悉的强子只包含  $u$  夸克和  $d$  夸克两种形式。例如, 质子是由两个  $u$  夸克和一个  $d$  夸克组成 ( $uud$ ); 中子是由一个  $u$  夸克和两个  $d$  夸克组成 ( $udd$ )。中性  $\pi$  介子是由正反  $u$  夸克对组成; 带正电的  $\pi$  介子是由  $u$  夸克与一个反  $d$  夸克组成; 带负电的  $\pi$  介子是由  $d$  夸克与一个反  $u$  夸克组成, 等等。相同的夸克组成也可以以“激发态”的形式出现。例如,  $\Delta^+$  重子, 具有与质子完全相同的组成, 但却要重 30%。50 年代物理学家们的粒子表迷雾重重, 不过好在一切在 60 年代又回归简洁。所有的这些观测到的客观存在都是  $u$  夸克与  $d$  夸克的不同组合。

我们将在第四章讨论夸克之所以只能有两种组合方式——要么重子要么介子——的原因。在第四章中, 我们将会看到, 夸克只能有重子和介子这两种组合实际上隐含着自然界的一个重要理论。(近来, 核物理学家们发现了含有四个夸克和一个反夸克的新物理实体存在的证据。所谓的五夸克态迅速引起了

67



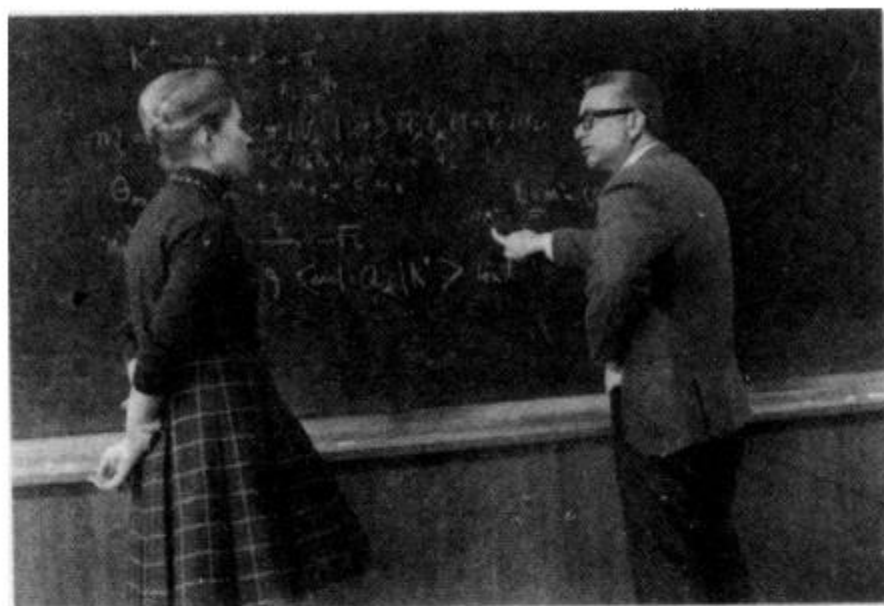


图 30 穆雷·盖尔曼与玛丽·盖拉德交谈中。盖尔曼对物理学的贡献可以列一张很长的表——发展了强子的夸克理论只是一小部分。他也是语言学与考古学方面的专家；他的一些同事相信盖尔曼比任何还活着的人在知识的广度和深度上都更胜一筹。盖尔曼于 1969 年被授予诺贝尔奖

物理学家们的兴趣，或许我们可以将五夸克态看成是重子和介子组成的“分子”。不过五夸克态的存在并不影响强子的夸克模型的正确性。)

值得注意的是人们从未观测到过“自由”的夸克，而且有足够的理由相信，也许我们永远也不能观测到一个“自由”夸克。我们可以很容易地分离出电子，可是夸克因为禁闭在强子中而很难被独立分离出来，即使这样，夸克的存在理由仍然是极具说服力的。当我们观测到粒子加速器实验中出现的强子喷柱时（图 31），我们就看到了独立夸克的效应。

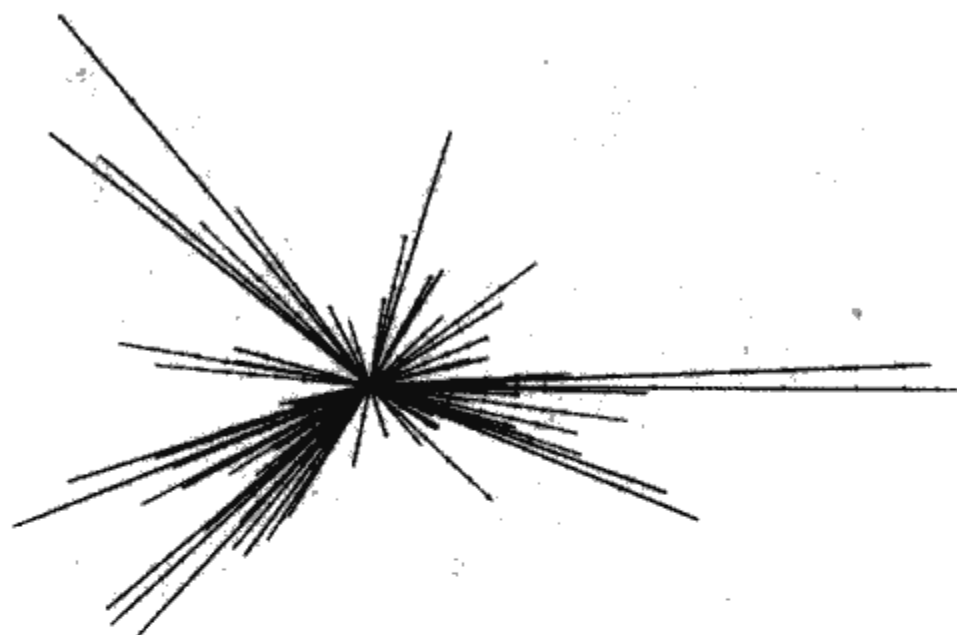


图 31 CERN 的 ALEPH 实验研究的是正负电子对的碰撞。正负电子彼此接近，达到一定距离后湮灭为能量爆，又根据爱因斯坦质能关系式  $E = mc^2$ ，迅速重新转化为物质。图中所示的碰撞过程，是能量转化为两个夸克与两个反夸克的过程。夸克必须“遮掩”自己，因此夸克出现的时候，我们看到的总是它们所形成的粒子喷柱。这些具有初始夸克动量的喷柱从相互作用点直接射向探测器。尽管我们从来没有真正看到过孤立的夸克，仍然可以根据这些强子喷柱推断出夸克的存在，否则就不能解释在大量的粒子物理实验中所观测到的强子喷柱

夸克不能孤立出现，这便导致夸克质量这样的概念有点含混不清。按普遍接受的夸克质量定义，u 夸克的质量为 4 MeV，d 夸克的质量为 7 MeV。（不要忘了质子的质量为 938 MeV；很明显的是，平常观测到的大量的亚原子粒子其大部分质量都是以束缚能的形式存在。）u 夸克与 d 夸克只比电子重——虽然只多了个 10 左右的因子。夸克的一种不平凡的性

质在于它具有分数电荷。质子电荷为 1，其中的 u 夸克电荷为  $2/3$ ，d 夸克电荷为  $-1/3$ 。（因为中子是夸克的 udd 三重态，所以电荷为  $2/3 - 1/3 - 1/3 = 0$ 。故而，物理世界展现给我们的是带整数电荷的物质，带分数电荷的粒子不能孤立存在，就像我们永远也观测不到自由夸克。）

### 电子中微子

与电子相伴的中微子的存在是沃尔夫冈·泡利（图 32）于 1930 年基于纯粹的对称性分析得出来的。原子核有时候会衰变成比较轻的核与电子，这就是所谓的  $\beta$  衰变。问题在于，在这样的衰变过程中，能量不守恒：末态原子核的能量加上电子的能量小于初态原子核的能量。出于保持能量守恒律，即物理定律具有时间变换不变性的考虑，泡利提出有另外一种粒子与电子一起射出。这个额外的粒子必须具有能使得能量守恒定律成立的那多余的能量。很可能这个粒子并不是实体，只能有一个极小的甚至可能是零的质量；很可能是电中性的粒子；但具有自旋，而且很可能是自旋  $1/2$  的费米子。费米给这个小粒子取了个名字——中微子（“中性的小东西”）。本书中我们将它称为电子中微子（符号  $\nu_e$ ），因为这个中微子与电子有密切的关系，而且这样可以与其他的两类中微子相区分。

从理论角度看，中微子的重要性不言而喻。但直到 1956 年，才由克莱德·科文（Clyde Cowan）与弗雷德里克·里因斯（Frederick Reines）两人首次探测到这个小粒子。实验上的困难在于，对电子、质子、中子等起作用的力对中微子几乎没有影响，它与物质之间的相互作用如此之弱，以至于人们很难

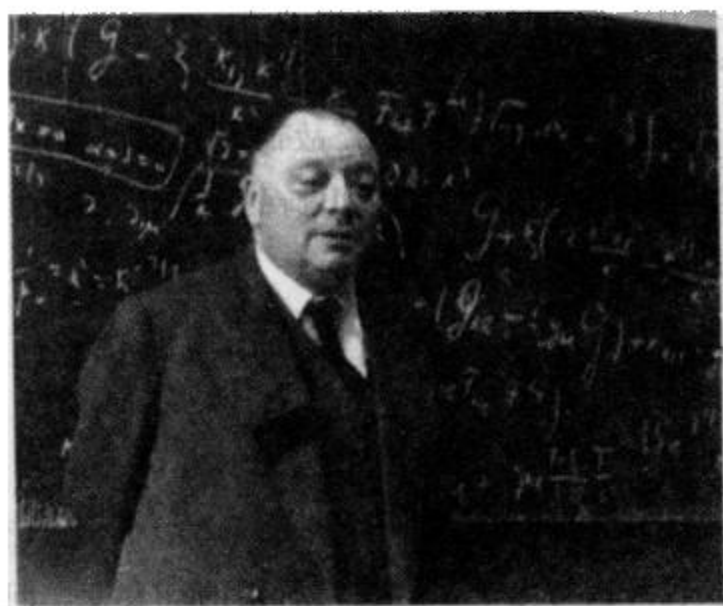


图 32 沃尔夫冈·泡利，1945 年诺贝尔奖获得者

捕获到它。

69

现代的中微子探测器通常建构于地表下的废弃煤井中或海底。数百米的岩石或深水可以有效地阻止宇宙线或其他辐射对探测器的干扰——而中微子却可以轻松地穿过并达到探测器。

电子中微子一度被认为是无质量的，但是近来的研究进展表明：电子中微子有一个很小的质量（小于 3 eV）。

在基本粒子家族中，电子及电子中微子自然地组成一对。通常将两者合在一起表示为  $(e, \nu_e)$ 。上夸克 (u) 及下夸克 (d) 也可以组成这样的一对  $(u, d)$ 。这两对合在一起就是基本粒子的一代。

我们能接触到的大部分物质都是由这一代的四个粒子组成的：u 夸克与 d 夸克构成质子与中子，而质子和中子又组成原子核。原子核与电子组成电中性的原子；原子的不同组合成为

不同的元素和化合物。电子、中微子似乎与我们的生活稍远一些，太阳内部的核反应形成大量的中微子（当你读这句话的时候，就有几十亿的太阳中微子穿过你的身体）。看起来，形成宇宙中的大部分物质有这样一代的基本粒子就足够了。但不知因为什么原因，这个家族还有两份拷贝。

### $\mu$ 子与其中微子 $\nu_\mu$

$\mu$  子由美国物理学家卡尔·安德森（Carl Anderson）和他的研究生塞斯·内德梅耶（Seth Neddermeyer）于 1936 年在宇宙线中发现。[早在 4 年前，安德森发现了反电子——电子的反物质（保罗·狄拉克曾预言反电子的存在）。由于这项发现，安德森获得诺贝尔奖。]  $\mu$  子中微子（符号  $\nu_\mu$ ）于 1962 年由美国布鲁克海文（Brookhaven）实验室的一个三人组——里昂·莱德曼（Leon Lederman），迈尔文·施瓦茨（Melvin Schwartz），以及杰克·斯坦博格（Jack Steinberger）首先发现，这三位科学家于 1988 年被授予诺贝尔奖。

数十年的研究确定  $\mu$  子质量是电子质量的 207 倍。（其静止质量是 105.659 MeV。）除质量外， $\mu$  子看起来与电子一模一样。它们有相同的自旋，相同的电荷；并且都有一个相伴的中微子。（ $\mu$  子中微子质量还不能确定，但不会超过 0.19 MeV。）

因此我们知道除了电子及其中微子对，还有  $(\mu, \nu_\mu)$  对的存在。没人知道大自然为什么需要这多余的粒子对。但是它们的确存在，就如电子及其中微子一样。



## 奇异夸克与粲夸克

70

想想看吧，假如公元前 50 年克利奥帕特拉 (Cleopatra) 从她的船上掉了下来而没能到达埃及，今天的世界会怎么样呢？由于一种长寿命的亚原子粒子的发现，50 年代的物理学家们就被迫面对了这样的谜题。1953 年，穆雷·盖尔曼引入了“奇异数”的概念，成功地解决了这个难题；日本物理学家西岛和彦 (Kazuhiko Nishijima) 与中野董夫 (Tadao Nakano) 也独立地提出了这一想法（见下面补充性文字）。这一切发生在夸克理论提出的 10 年之前，夸克模型很好地容纳了“奇异数”的概念。

### 奇异数

50 年前的物理学家们常常会使用时间作为标度来区分各种各样的相互作用过程。强子之间的典型相互作用标度是  $10^{-23}$  秒。弱相互作用的典型时间标度要长些——是  $10^{-8}$  秒。电磁相互作用的时间标度则取决于相互作用的物体之间的距离。

实验发现，有些强子可以通过极短时间—— $10^{-23}$  秒——的碰撞过程产生。而这些强子却又能经过很长时间—— $10^{-8}$  秒——才衰变。（1% 微秒看起来也许并不长，但若和该强子的产生时间相比，这 1% 微秒简直就是永恒了。）因此这些强子是通过强相互作用产生，而通过弱相互作用衰变。这样的发现给物理学家们出了一道难题。物理学家们想不出为什么会有这样奇怪的强子：通过强相互作用产生而不通过强相互作用衰

变；它们看起来很反常，具有奇异的性质。

这种现象的解释是有些强子具有一种被称为奇异性的性质，这个奇异性在强相互作用中守恒，而在弱相互作用中不守恒。例如，奇异数为 0 的  $\pi$  子与奇异数为 0 的质子碰撞，可以通过强相互作用产生两个具有相反奇异数（总奇异数仍然为 0）的粒子。若产生的这两个粒子是最轻的奇异粒子，则它们就不能够再通过强相互作用衰变了，因为粒子只能衰变到比自身轻的粒子，但却没有更轻的带有奇异数的粒子了。于是这样的带有奇异数的粒子只能通过弱相互作用衰变，因为弱相互作用中奇异数不守恒，所以可以衰变到其他不带奇异数的轻粒子。

奇异数 S 只是某些强子具有的性质。所以人们推测，除 u 夸克与 d 夸克外，还有另外一种夸克——s 夸克存在，它的奇

71  
奇异数  $S = -1$ 。对应的反 s 夸克的奇异数  $S = +1$ 。u 夸克与 d 夸克的奇异数都是 0。故而根据强子的夸克模型，含有一个 s 夸克的重子奇异数为 -1（由 dds 夸克组成的  $\Sigma^-$  就是此类重子）。若重子含有两个 s 夸克则奇异数为 -2（例如  $\Xi^-$  重子，由 dss 夸克组成）。同样的，具有三个 s 夸克则奇异数为 -3（由 sss 组成的重子名字是  $\Omega^-$ ）。很明显， $S = -3$  是夸克模型中可能出现的最大奇异数了。在现有的所有的粒子碰撞实验中，从未观测到奇异数大于 3 的事例；如果夸克理论就是正确的理论，那么永远也不会探测到奇异数大于 3 的粒子。

s 夸克的质量大约 100 MeV，电荷  $-1/3$ 。

类似的长寿命粒子的出现使物理学家们认识到还有一些强



子具有其他的类似于奇异数的概念，这次人们将其命名为粲数。夸克模型中的第四种形式——粲夸克（符号  $c$ ）——与之对应。粲夸克于 1974 年被观测到，质量约为 1200 MeV，电荷  $2/3$ 。

两对轻子  $(e, \nu_e)$  与  $(\mu, \nu_\mu)$  分别与两对夸克  $(u, d)$  与  $(c, s)$  对应。于是我们有了第二代基本粒子。

### $\tau$ 子与其中微子 $\nu_\tau$

上面关于  $\mu$  子的大部分内容也同样适用于  $\tau$  子。1975 年，斯坦福直线加速中心由马丁·佩尔（Martin Perl，图 33）领导的实验组首先发现了  $\tau$  子。佩尔的发现令人相当意外，因为这无疑意味着第三代基本粒子的存在。虽然理论已经被推广至第三代，但推理并不严谨。之后不久， $\tau$  子质量也被弄清了，大约 1784 MeV，是电子质量的 3500 倍。

$\tau$  子发现后，人们自然会着手寻找其相伴的中微子。但直到 2000 年， $\tau$  子中微子  $(\nu_\tau)$  的存在才由一个包含了 54 位物理学家的国际实验合作组 DONUT（“ $\nu_\tau$  的直接观测”的英文缩写）在费米实验室的加速器 Tevatron 上发现。 $\nu_\tau$  的质量比其他的中微子质量大很多（具体数值尚未确定，但其实验上限为 18.2 MeV）。

于是我们有了三代轻子： $(e, \nu_e)$ ， $(\mu, \nu_\mu)$  与  $(\tau, \nu_\tau)$ 。

### 底夸克与顶夸克

上面关于  $c$  夸克与  $s$  夸克的内容同样适用于第三代夸克：顶  $(t)$  夸克与底  $(b)$  夸克。顶夸克与底夸克对  $(t, b)$  与





图 33 马丁·佩尔与弗莱德里克·里因斯分享了 1995 年的诺贝尔物理学奖。佩尔因为在 1975 年发现了  $\tau$  轻子而获奖，他的发现意味着第三代粒子的存在；底夸克发现于 1976 年，顶夸克发现于 1995 年， $\tau$  子中微子发现于 2000 年。现在一般认为不太可能有第四代粒子存在；所有的轻子与夸克都已经被发现

( $\tau$ ,  $\nu_\tau$ ) 组成基本粒子家族的第三代。

b 夸克于 1977 年在费米实验室由里昂·莱德曼领导的实验组发现。莱德曼实验组发现的介子为  $\gamma$ ，由底夸克及其反粒子组成。b 夸克的质量为 4.2 GeV，电荷同 d 夸克与 s 夸克，为  $-1/3$ 。

t 夸克于 1995 年在费米实验室的加速器上由两个不同的实验组发现，质量约为 180 GeV。这么大的质量已经接近于金原子核的质量了，而金原子核包含 197 个质子与中子。t 夸克



的质量是现今观测到的所有基本粒子中最大的。同  $u$  夸克与  $c$  夸克一样， $t$  夸克的电荷为  $2/3$ 。

通过以上的这些内容我们简要地纵览了基本粒子的费米子部分；接下来我们将浏览一下基本的玻色子。我们在第四章中将会看到，基本玻色子所扮演的角色与基本费米子全然不同。玻色子是作为基本的力的传递者出现的。

73

## 光 子

光子（符号  $\gamma$ ）是电磁相互作用的传递者。可以与任何带有电荷的粒子发生相互作用。

在所有基本粒子中，光子是我们所最熟悉的。我们看得见光；能感受到辐射的热量；用微波炉烹饪；用 X 射线检查身体。所有这些都是与光子有关的现象。我们给光子起了很多的名字——无线电波、可见光、 $\gamma$  射线，等等——所有的这些名字都只是根据频率（对光来说也相当于是能量）起的。从更深层次来看，所有这些不一样的现象在根本上都是一样的，都与光子的发射与吸收相关。

光子在宇宙中极为普通：大约一个形成质子的夸克三重态要对应于 100 亿个光子。解释这巨大的光子质子比是宇宙学家与粒子物理学家们共同面对的重大任务。

## W 玻色子与 Z 玻色子

我们已经知道夸克有 6 种不同的类型（或称之为“味”）：上，下，奇异，粲，顶，底。带电轻子有三种不同的类型：电子， $\mu$  子与  $\tau$  子；每种轻子都有与其对应的中微子。在某些辐

射衰变或粒子碰撞过程中，夸克的味会发生改变。一个下夸克变为一个上夸克或者一个  $\mu$  子变为一个电子（当然，在这两种改变中也有其他的粒子参与）。与味改变过程相关的基本力是弱力，弱力的传递者有两种类型：W 玻色子与 Z 玻色子。

弱力对所有的基本费米子都起作用，不论是轻子还是夸克；宇宙中一些最重要的过程与弱力有关。如果没有弱相互作用的存在，在太阳中产生能量的原子核的链式反应就会崩溃。太阳不会发光，而生命也许就不存在了。

W 玻色子带有一个单位的电荷（所带电荷可正可负，分别为  $W^+$  与  $W^-$  玻色子）。W 玻色子非常重——大约 81.8 GeV。

除了味改变过程的弱相互作用，还有不改变味的弱相互作用。传递不改变味的弱相互作用的电中性粒子为  $Z^0$  玻色子。 $Z^0$  玻色子要重于 W 玻色子——质量为 92.6 GeV。从很多方面看， $Z^0$  玻色子都像是一个光子的有质量版本。事实上，如我们将会第四章中看到的那样，在讨论各种相互作用时，人们发现光子与 W 玻色子和  $Z^0$  玻色子有很深刻的内在联系。

## W 玻色子的发现

大约 60 年代末，理论学家们就已经预言了 W 玻色子的存在。但如此高质量的粒子（W 玻色子大约是质子质量的 90 倍）很难产生出来，因此直到 1982 年人们才首次探测到 W 玻色子（图 34、图 35）。

发现之后经过数年的不断探索，已经将 W 玻色子与  $Z^0$  玻色子的一些性质测量到千分之几的精度。直到这样的精度，理



论预言与实验仍然符合得很好。

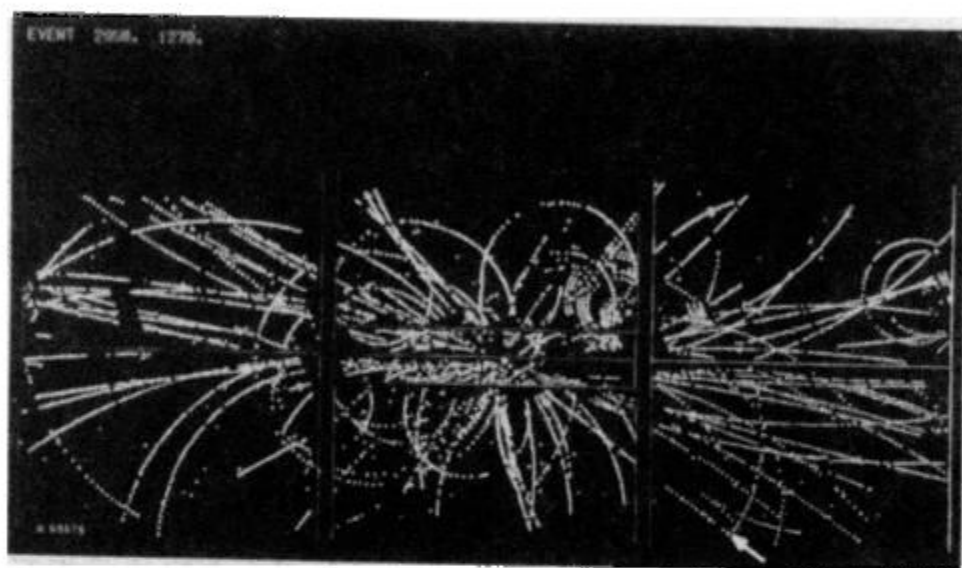


图 34 UA1 探测器 1982 年 10 月到 12 月发现的一个事例。该事例产生了一个具有大横动量的电子（照片中右下部分的箭头所示为电子）。与电子背对背产生的是“丢失的能量”——意味着一个中微子发射出去。该事例唯一合理解释是产生了一个  $W$  玻色子，随后  $W$  玻色子衰变为电子与电子反中微子

75

适宜能量的正负电子对撞就会产生  $Z^0$  玻色子（图 36）。 $Z^0$  玻色子要么衰变到正反夸克对，要么衰变到正反轻子对。这样的衰变过程很容易探测。

## 胶 子

20 世纪 50 年代末，物理学家们认为强力作用于质子和中子并将两者束缚于原子核内。现在我们知道作用于质子和中子的核力只不过是更强更基本的力——将夸克胶连在一起形成质



图 35 1976 年，照片中的印度物理学家卡罗·鲁比亚（Carlo Rubbia）产生了一台将现有加速器转化为质子反质子存储环的想法，他的想法是希望存储环中的粒子可以具有足够高的能量，以便能够彼此碰撞产生 W 玻色子与 Z 玻色子。荷兰物理学家范·德·米尔（Van der Meer）根据鲁比亚的想法发明了一种存储质子与反质子的方法。W 玻色子与 Z 玻色子发现后，两人于 1984 年同获诺贝尔物理学奖

子和中子的力——的剩余相互作用。这种作用于夸克之间的强作用力的传递者为胶子（gluon，简称“g”）。76

像夸克一样，胶子也不能被孤立地分离出来。但也正如夸克一样，不容置疑的实验证据显示着胶子的存在。1979 年，实验上探测到了由正负电子碰撞的产物形成的粒子“喷柱”，物理学家们相信这就是胶子存在的明白无误的证据（图 37）。

在某些方面，胶子有点像光子。光子与荷——电荷——“耦合”，从而传递电磁相互作用。胶子也与一种荷——我们将在下章详细介绍的色荷——耦合，从而传递强相互作用。胶子与光子的主要区别在于：光子是电中性的；而胶子本身就是带

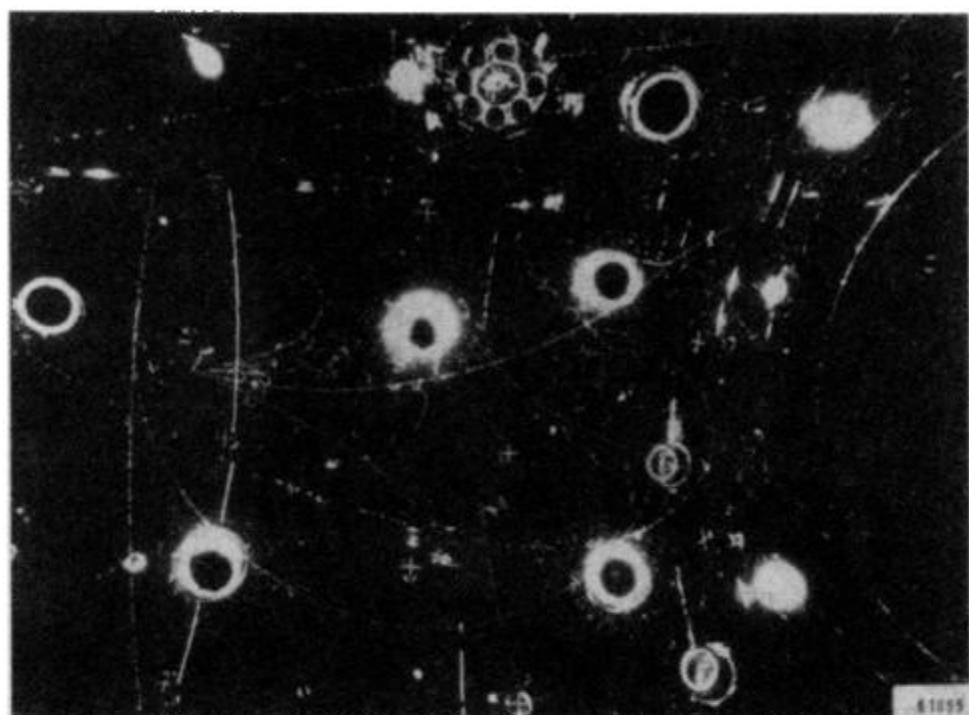


图 36 摄于 CERN 的 Gargamelle 气泡室的这张图片于 1973 年首次发表。一束  $\mu$  中微子穿过充满氟利昂的气泡室；中微子本身不留下痕迹，但是在这张照片的左中位置，我们看到有一束不知从哪里突然冒出来的粒子飞沫。这些粒子显然应该是氟利昂的核与某种有能量的中微子——但却不可见——的碰撞。除了任何粒子都参与的引力相互作用，中微子就只参与弱相互作用。像这张照片中的弱相互作用，人们一般认为  $\mu$  中微子会转化为  $\mu$  子；但在这张照片的粒子残片中我们却没有找到  $\mu$  子——中微子继续着它令人难以琢磨的旅程。因此关于这张照片唯一可能的解释就是中微子参与的相互作用是交换中性粒子—— $Z^0$ 。这张照片是中性弱相互作用的第一份实验证据，它的重要性在于中性弱相互作用的存在是电磁相互作用与弱相互作用统一理论的独特预言（10 年之后，物理学家们才第一次直接地分离出  $Z^0$  粒子）

色荷的。事实上，共有八种胶子，每种胶子带有一种色荷。正

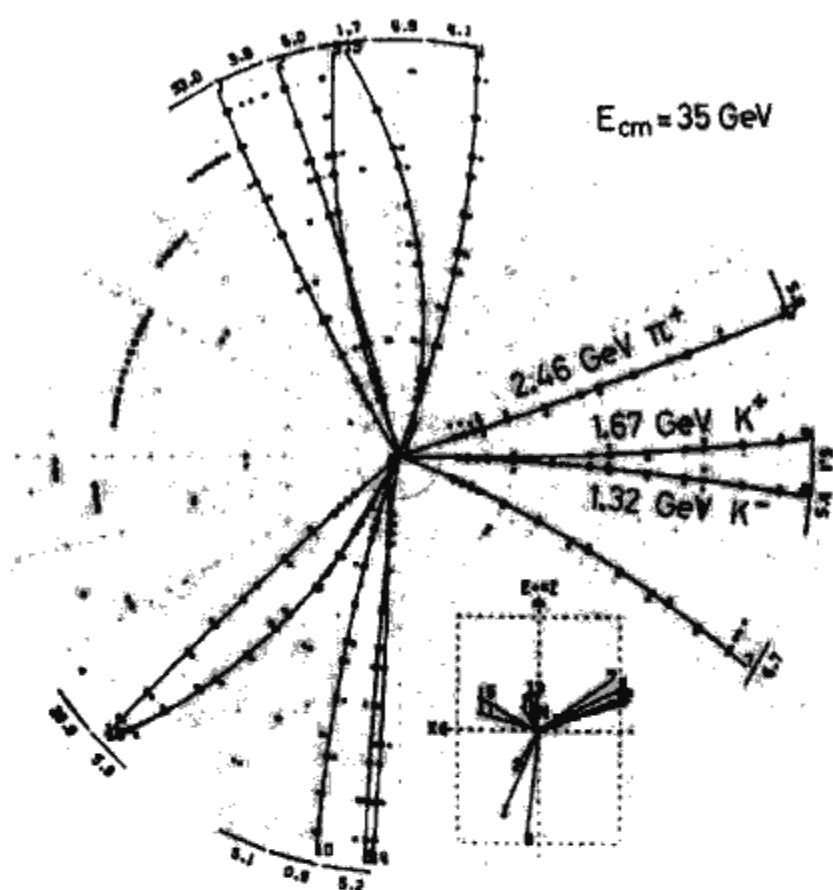


图 37 胶子是强力的携带粒子，于 1973 年首次在 PETRA（坐落于汉堡的 DESY 正负电子对撞机）发现。如同夸克一样，胶子也永远不能被分离出来；胶子夸克都被禁闭在强子内。不过我们仍然可以通过观测具有一定性质的粒子“喷柱”来了解夸克与胶子：比如这张照片中的喷柱，只能用胶子的存在来解释

因为胶子带有色荷，所以胶子可以与自身相耦合，这一点与光子截然不同，由此导致了某些新奇的可能，比如，胶球——只有胶子组成的新的物理态。

到此为止，我们即将结束我们的纵观宇宙基块之旅。如图 <sup>77</sup>



38 所示，真正的基本粒子数目相当之少。看起来有点令人不可思议：如此之少的基本粒子构成了我们身边这美丽却错综复杂的大千世界。

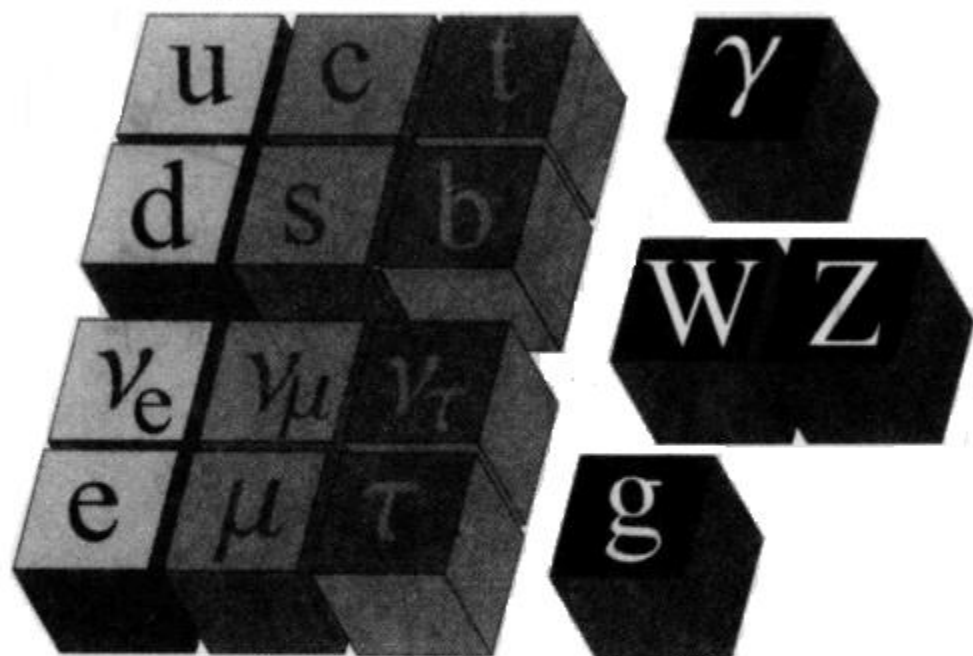


图 38 宇宙的基块。上面两行的六个小块代表六种夸克（上夸克、下夸克、粲夸克、奇异夸克、顶夸克、底夸克）。下面两行的六个小块代表六种轻子（电子中微子与电子， $\mu$ 子中微子与 $\mu$ 子， $\tau$ 子中微子与 $\tau$ 子），每一种夸克与轻子都有其对应的反粒子。夸克和轻子同时也按列排列；每一列代表一代粒子。右边的小块代表传递力的粒子：光子，弱玻色子 W 与 Z，以及胶子。利用这些基块，我们就可以建构粒子物理的模型



## 第四章 | 标准模型

79

诚然，美并没有绝对的标准  
然而，这正是对其追求的非凡意趣之所在

J·K·加尔布雷思 (J. K. Galbraith)

我们现在对微观世界的理解是按照量子场及其相互作用来定义的，在现代所有的关于量子场及其相互作用的理论中，最成功的就是粒子物理的标准模型。

标准模型是 20 世纪最耀眼的一项科学成就，是一百年来物理学家们苦苦探求而得到的精髓，其理论框架深深地植根于最可靠的实验证据。事实上，在本书写作的时候，标准模型可以很好地解释所有的在最小尺度上的物质间相互作用的实验结果。只有引力理论未被包括在标准模型之中（粒子物理实验研究的都是很小的质量的粒子，对于这样小质量的粒子，其引力效应太小以至于可以完全忽略掉）。本章介绍一些标准模型的关键概念。理解这些想法并且了解标准模型的巨大成功之后，我们将会更加清醒地认识到标准模型的不足之处；我们也会体会

80



到究竟是什么驱使物理学家们去思索诸如大尺度的额外维度及对撞的宇宙这样的疯狂想法。

## 我们最好的理论

一种理论，只要它还能起它该起的作用，就别为它操心。

罗伯特·A·海因莱因 (Robert A. Heinlein)

标准模型指的是自洽地解释已有的所有微观世界实验结果的理论——事实上毋宁说是理论的集合：所有的麦克斯韦电磁理论现象，所有辐射性的研究，所有粒子加速器实验室的数据——所有的这一切都可以用标准模型解释。至少到目前为止，标准模型是我们关于组成宇宙的基本物质及这些基本物质之间的相互作用的各种“为什么”的最终答案。值得称道的是，相对于如此宽广的领域，标准模型本身是极为简单的：仅仅包括两块基本内容。

首先，标准模型的基本粒子总是对应于基本场的量子。粒子是标准模型的“单词”。自然界中有两种基本类型的场：费米子场和玻色子场。在标准模型中，费米子有两种类型：三代轻子（电子及其中微子， $\mu$ 子及其中微子以及 $\tau$ 子及其中微子）及三代夸克（上夸克及下夸克，粲夸克及奇异夸克，顶夸克及底夸克）。这12种费米子每种都有与其对应的反粒子。除费米子外，还有自旋为1的基本玻色子：光子，三种弱相互作用玻色子（ $W^+$ ， $W^-$ 及 $Z^0$ ）以及八种胶子。玻色子是其自身的反粒子。宇宙中所有的常见物质都可以由这些基本的组员构建

而得。

另一方面，这些基本粒子仅按三种方式相互作用（记住我们已经忽略了引力的存在）。相互作用就是标准模型的“语法”。基本粒子可以通过电磁力而相互作用于彼此，稍后我们将会看到，电磁力只是统一的电弱相互作用的一个方面。电磁力可以作用于每一个带有电荷的粒子——换句话说就是仅有中微子不受电磁力的作用；传递电磁相互作用的粒子是光子。基本粒子也可以通过弱力相互作用，弱力是统一的电弱相互作用的另一个方面。所有的粒子都参与弱相互作用（并且也是中微子参与的唯一相互作用），但是弱相互作用的效果常常被其他的相互作用所掩盖；其传递相互作用的粒子是 W 玻色子与 Z 玻色子。基本粒子之间的第三种相互作用是强相互作用。强相互作用仅作用于带有色荷的粒子（也就是说，只有夸克与胶子能够参与强相互作用）。正是强相互作用将夸克束缚于强子之内；强相互作用是通过胶子传递的。传递每一种相互作用的粒子与各种荷之间用被称之为耦合常数的特殊“胶水”粘在一起。耦合常数是彼此不同的，因而这三种相互作用的强度也是不同的。

81

在前一章中我们已经了解了一些推动标准模型发展的实验内容——即基本粒子的产生与探测，这些基本粒子就是我们的词汇表。为便于更好地理解标准模型的结构，我们显然需要了解这些基本粒子的相互作用。那么，现在是我们来学习一些语法知识的时候了。

在日常生活中，我们可以看到很多不同种类的力——汽车引擎中的摩擦，各种飞行器的起降，建筑物中的张力，等等。



但是从夸克与轻子的量子水平上看，只有三种力——或者说三种力的相互作用才是基本的，其余的力只不过是电磁相互作用、弱相互作用以及强相互作用彼此相消后的残留效应。例如，将质子与中子束缚于原子核内的核力，就是各种核子中夸克间的强相互作用的残余作用。从更大的尺度上看，球棒将球击飞的力从根本上来讲是球棒和球中电子的电磁相互作用。

量子尺度上对力的描述不同于我们的日常生活中对力的描述。我们来看一下电子之间的相互作用。由于不确定原理的存在，电子可以不停地发射虚光子，这些虚光子可以被其他的电子吸收，在这个过程中，两个电子之间就进行了能量动量的转移。在经典物理框架下，可以认为这两个电子彼此排斥；但是在量子水平上，电子之间的这种力的作用实际上通过交换虚光子来传递。因而，从根本上来看，电磁相互作用是通过交换虚光子发生的；类似地，弱相互作用是通过交换  $W$  玻色子与  $Z$  玻色子来传递的，而强相互作用则是通过交换虚胶子来传递的（在某种意义上，费米子是“物质的粒子”，而玻色子则是“力的粒子”）。

### 标准模型之外的物理线索

对于所有尝试过的探索微观世界的实验，标准模型都可以很好地与实验结论符合。然而，近年来的实验也暗示着在标准模型之外或许存在着一些未知的新物理。

检验标准模型的可靠方法是：对实验上可精确测量的物理量，按标准模型理论进行计算，如果理论结果不能与实验结果很好地符合，则可以推知标准模型是不完备的。目前，这一方

法的最好例子之一是一个与  $\mu$  子有关的实验。

若电子（或  $\mu$  子）在垂直于运动方向的单位磁场中运动，则其运动轨迹是一个圆环。电子和  $\mu$  子都具有自旋。假设初始时其自旋方向指向运动方向，那么当粒子运动一周时磁场会对粒子有什么影响呢？简单的量子力学计算预言其自旋轴仍然会指向粒子的运动方向。但是在 20 世纪 40 年代的一些实验中，人们发现当电子在磁场中运动一周后，其自旋方向会有微小的改变。对这一反常行为的解释促成了量子电动力学（QED）的发展。现在我们知道，电子运动的时候会连续地放射并同时吸收短寿命的虚粒子，正是这一过程使得电子的自旋取向发生改变；而 QED 可以极为精确地计算出这种改变的大小究竟是多少，磁场中运动的电子其自旋改变值，按 QED 理论所做的计算与实验的结果符合得令人惊叹：两者一直到小数点后面 10 位都完全一致！

同样由于发射和吸收虚粒子，在磁场中运动的  $\mu$  子自旋方向也会发生改变。但是  $\mu$  子比电子的质量大很多倍，所以  $\mu$  子有很大的几率吸收和发射有质量的粒子。例如  $\mu$  子发射和吸收  $Z^0$  玻色子的效应比电子的要大 40000 倍。这样的事实正好可以作为发现标准模型之外的新物理的一个窗口。我们可以假设只有标准模型粒子与  $\mu$  子有相互作用，则在磁场中运动的  $\mu$  子的自旋方向改变全部可以按标准模型理论计算得出，然后将计算结果与实验上的观测量比较。如果两者不相符，那么就可能是超出标准模型之外的有质量基本粒子与  $\mu$  子相互作用的结果（比如我们在第五章中讨论的超对称粒子）。

最近，在位于纽约厄普顿的布鲁克海文国家实验室中，对



$\mu$ 子测量所得到的结果要比理论的预期值大。但是从统计意义考虑，实验与理论的差距仍然是很小的，所以只有经过实验物理学家们未来多年的努力后，才能肯定地说他们所观测到的是标准模型之外的新物理效应。

83

在现实中，人们根本不可能从数以万亿计的电子间的相互作用效果去理解球棒对球的作用，甚至用几打夸克间的相互作用效果去理解核力都是非常不容易的。但是在粒子加速器上我们却可以研究最简单的情形：两个粒子通过交换传递力的粒子彼此相互作用。而正是通过这样的实验，物理学家们才能够研究相互作用，建立像标准模型这样的理论。

完备地描述这些基本相互作用的理论是两种相对论性量子场论。量子色动力学是关于强相互作用的理论，而电弱理论则是将电磁相互作用和弱相互作用统一到一个理论框架下描述的基本理论。（所以，在更深的层次上看，基本粒子的相互作用理论只有两种，尽管我们本来分别着眼于它们三种。）这些传递力的玻色子，它们的奇妙之处，不仅仅在于相互作用要通过交换虚玻色子才能实现，更在于玻色子本身的存在是对称性的要求。所以在我们深入地理解相互作用之前，先让我们来了解一下对称性在其中所扮演的角色。

## 局域规范对称性

繁忙辛勤的劳作之后，才可以拿起你的尺子，丈量收获。

伊丽莎白·巴莱特·勃朗宁 (Elizabeth Barrett Browning)，

《奥罗拉·黎》(Aurora Leigh)

在前一章中，我们将相位作为规范对称性的一个例子加以讨论。其中所讨论的规范变换具有整体规范对称性：在某处选定相位零点，则所有位置的相位零点均相同（图 28）。假定我们允许不空的时空点可以取不同的相位零点。如图 39 所示，换句话说，每个不同时空点的观测者可以选取自己的规范。这样的假定有其显而易见的合理性；毕竟，远方行星上生命体对规范的选取总不会影响到我们吧。可是如果我们允许每点有不同的规范，那岂不相当于对称性崩溃了。令人惊奇的是，我们可以引入一种场——规范场——保持对称性，抵消相位随时空坐标变化而引起的作用。在对称性完美存在的情况下，规范场无质量，因而与之相伴的是一个无质量粒子。对于狄拉克场，这个规范场就是电磁场——相应的无质量规范粒子就是光子！<sup>84</sup>

我们换个角度来看，若我们要求狄拉克场具有局域规范对称性，则必须引入电磁场。这是对称性原理在物理学中强大力量的一次美妙展示。假若要求所有其他的场都满足局域规范对称性，数学逻辑自动会使我们得到一个与所有的电磁现象有关的理论：该理论被称为量子电动力学 (QED)。狄拉克场的连续规范变换构成一个  $U(1)_{EM}$  规范群（下标提醒我们这个规范群

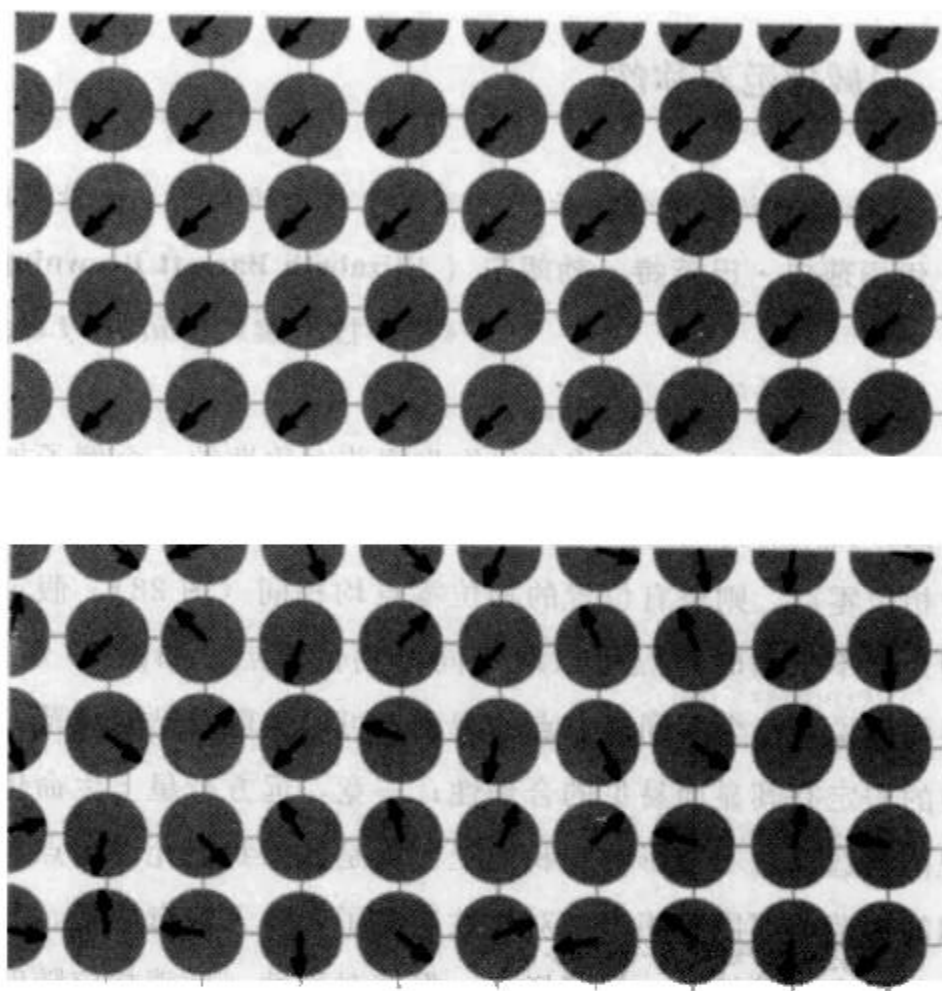


图 39 我们仍然用起始于半径为 1 的圆的圆心而终止于圆周的箭头来代表狄拉克场的相位。这里可以自由地选择箭头的方向。在上边的图中所有的观测者选取相同的方向；而在下边的图中，每个观测者选取不同的箭头方向。需要注意的是，若物理定律在后者这样的变换下不改变，则会引入一种场——规范场——用以消除相位随时间和位置的变化率。这就是所谓的规范对称性。对狄拉克场来说，规范场就是光子

是关于电磁场的  $U(1)$  规范群，而不是用于其他场的)。用行话来说，QED 是一个  $U(1)_{EM}$  规范理论。



接下来我们将会看到，所有的相互作用都具有局域规范不变性。我们可以在任意时空点自由地选取规范，同时要求有一个起抵消作用的规范场的存在，规范场可以反映出每点所取的规范如何。同样，连续规范变换也可以构成另一些类型的群——弱相互作用的  $SU(2)$  群和强相互作用的  $SU(3)$  群。标准模型就是基于局域规范对称性思想的一组相对论性量子场论。其中 QED 是最简单的理论，其他的理论都是模仿 QED 的形式建立的。因而我们很有必要详细地了解一下 QED。

## 电磁相互作用

周一、周三、周五，上帝用波动理论管理电磁相互作用；

周二、周四、周六是魔鬼用量子理论的时间。

威廉·布拉格 (William Bragg) 爵士

量子电动力学发展于 20 世纪 30~40 年代；然而在早期的理论形式中，进行任何计算都极为困难——即使像一对电子之间的散射这样最简单的计算也非常不容易。直到富有神奇想象力的物理学家理查德·费曼（图 40）发展了一套方法简化计算过程，人们才得以真正开始使用量子电动力学。费曼发明了一套图形工具来进行复杂的数学计算，这就是现在所说的费曼图。在费曼的方法中，一个物理过程用图形来表示。比如最基本的电子对散射过程即如图 41 所示。

只需要记住两件事我们就可以很容易地解释图 41。首先，从图的左边到右边意味着时间上是从过去到未来；其次，图的



图 40 理查德·费曼在物理学家群体中是一位极具影响力的人物。因为他的探险方面的书——《别闹了，费曼先生》、《你干吗在乎别人怎么想？》——使他成为家喻户晓的人物。费曼于 1965 年与他人分享诺贝尔奖

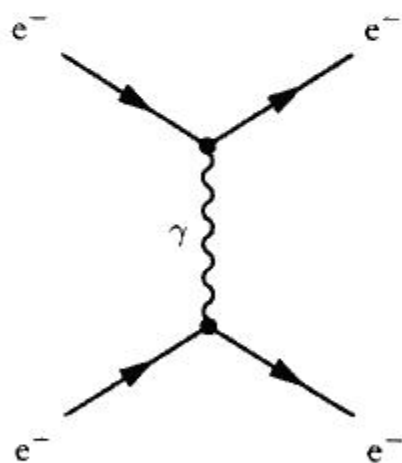


图 41 一对电子（符号  $e^-$ ）通过交换光子（符号  $\gamma$ ）的散射过程变成另外一对电子的费曼图

每一部分对应于特别的符号。图中的这些线并不代表实际的粒子轨迹，不是粒子在气泡室留下的轨迹（所以不同于图 24 的轨迹）。在脑中记住这一点。这样的图描述的是两个人射电子交换一个光子，剩下两个出射电子。在这个过程中，电子的能量动量转移——即受到力的作用。其中的虚光子不是实际可观测的物理量；能够被观测到的只是入射电子和出射电子。经典物理学中，如果两个电子初始时处于静止状态，我们就可以说两个电子受到“点电荷的排斥力”作用；这里，我们说电荷之间的相互作用是通过交换光子来实现的。

86

费曼图的意义并不仅仅在于将一个量子过程变成一个易于理解的图，更在于它本身就是一个数。从根本上讲，费曼图代表的是一个量子过程发生的几率。费曼发展了一套规则来赋予图中的每一个元素一个数学因子——出射及入射的外线粒子有自己的因子，交换的内线光子有自己的因子，甚至费米子发射或吸收光子的顶点也有其因子。我们正确地赋予图中每一个元素因子后，即可以计算这个图形所对应的数的大小了。你所要做的仅是按费曼开的处方直截了当地算出结果。以下是这个方法的关键几点。

假设你要分析一个特别的物理过程——比如，一对电子的散射，那么费曼会首先告诉你画出你需要的外线的所有可能的图形（在本例中，外线是两个人射的电子和两个出射的电子），计算每个图所对应的数，然后将所有图形所对应的数加起来，所得的结果就是该过程发生的几率。于是你就可以立即将你的计算结果与真正的实验相比较了。

使用这个方法时要注意两个问题，其中之一很明显，另一



个则并非如此。

第一个问题是我们需要画出相关过程的费曼图。但是，任何一个过程的费曼图都有无限个！

例如，在我们所考虑的这个电子对的散射中，我们可以想象电子交换了一个光子，其中的光子可以变成一对正反电子然后再湮灭成光子。这样的恶作剧在量子水平上随时发生。又或者散射的这个电子对之间交换了三次光子。再或者交换的那个光子变成正反电子对然后又湮灭成光子，接着，再来一次，光子又变成电子对并且再次湮灭成光子，总之交换的还是一个光子，但其中发生了很多故事。不论是哪种情况，所要观测的物理过程都一样——入射的是两个电子，出射的也是两个电子——可是其内部发生了什么却可以千变万化。那么我们如何计算这无限多个图形对这同一个物理过程的贡献呢？

幸运的是，费曼所发明的这些规则中的一条说的是：每一个这样的费米子-光子顶点都要正比于一个常数—— $\alpha$  的开平方，这个  $\alpha$ （大小为  $1/137$ ）正是电磁场的耦合常数——著名的精细结构常数——电磁力大小的量度。因为精细结构常数小于 1，所以，若一个费曼图中包含的顶点越多，这个图对最后的总结果的贡献也就越小。图 41 是所谓的树图：只有两个顶点。像上面提到的那种所交换的光子变为一对正反电子然后再湮灭成光子对的过程则会多出一对顶点，这样相应的结果就会自动地多出一个  $\alpha$ ，也就是一个  $1/137$  因子。这样粗略地估计大概这种图形的结果只能是树图的 0.7%。所以，我们不必计算这些高阶效应就已经可以得到一个很精确的结果了，最开始的几阶计算对于实验精度已经够高了。量子电动力学是一个典

型的微扰理论：量子力学所要求存在的高阶效应对于低阶结果只有小的微扰（当然，如果我们需要更加精确的计算结果，又或者我们有足够持久的毅力和耐心，我们当然可以计算出更高阶的结果的影响）。

这里所涉及的概念相当重要，这种重要性不仅仅体现在这里，也体现在下面的几章中，所以很有必要用稍微不同的方式再陈述一遍。量子电动力学这个场论的理论结构，我们只须几行字便足以写下它的数学公式。但不幸的是，若我们想要解析地计算这个理论，那实在是太难了。我们甚至不知道更简单情形下的关于电子行为的漂亮的数学表达式。我们所能使用的最好的工具就是微扰论，我们使用它获得一阶阶更加精确的理论结果。在 QED 上大自然已经对我们够好了：因为耦合常数非常小，微扰方法非常有效。

88

另一个问题是，当我们计算如图 42 所示的那种费曼图时，我们的计算结果将是无限大。在微扰计算的每一阶，我们都会遭遇很多个这样的无限大结果的图。20 世纪最伟大的几个物理学家为之奋斗数年以期找到对付无限大的方法。最终的方法由费曼、朱利安·施温格（Julian Schwinger，图 43）以及朝永振一郎（Sanitiro Tomonaga）先后独立发明，这就是所谓的重正化。重正化的基本想法是，这些无限大起源于小距离上的电子结构的贡献。这些无限大告诉我们，在很小的尺度上（换一种说法是高能处）理论崩溃，必须有其他的理论代替现有的观点。这本身并不是一个问题；理论上我们本来就认为 QED 理论最终会崩溃，而在实验上，我们又不能去探索这样的高能区域。这里的问题在于无限大的出现令我们没法计算那



些我们在现阶段就能够实验测得的物理量。费曼、施温格以及朝永振一郎首先认识到这些有问题的图影响的仅仅是电子质量、电荷及耦合常数。但是我们所知的这些量都是从实验上测得的。所以我们可以将这些无限大一股脑地放进所谓的“裸”质量、“裸”电荷及“裸”耦合常数的定义中。这些裸质量、裸电荷及裸耦合常数是无限大的。而我们所关心的只是那些我们一直使用的物理上的质量、电荷及耦合常数。根本上说，如果我们在计算费曼图时所使用的物理上的量，那么我们实际上可以忽略掉所有的无限大的贡献的图。

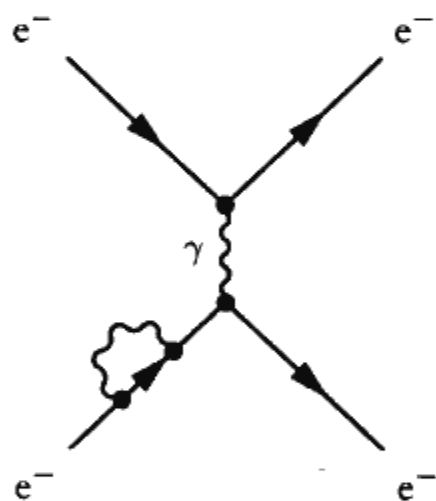


图 42 在这张图中，一个电子先发射再吸收了一个光子。计算这样的图会得到无限大的计算结果。此处的无限大来源于对电子质量的无限大贡献

只有一部分理论，其中的高阶图所带来的无限大可以用这样的方法处理掉；换句话说，只有一部分的理论是可重正化的。好在规范理论是可重正化的，规范理论的一种——量子电动力学——当然也是可重正化的场论。



图 43 朱利安·施温格，他与朝永振一郎及理查德·费曼由于他们在量子电动力学方面的贡献而一起分享了 1965 年的诺贝尔物理学奖

QED 的很多基本想法也可以用在 QCD 强相互作用的量子场论上。那么现在我们就一道来了解一下强相互作用的量子场论。<sup>89</sup>

## 强相互作用

比诗人们能够想象的更加强大。

阿尔弗雷德·丁尼生 (Alfred Tennyson),

《悼念集》(*In Memorium*)

正如量子电动力学是描述带电荷的粒子的动力学；量子色



动力学是描述带色荷的粒子的动力学。

量子色动力学的基本想法是夸克（轻子则不是）带有类似于电荷的色荷。色荷有三种类型：红、绿、蓝。夸克的这种色并不真的是我们说的颜色，至少不是我们日常所说的色的意思。它只是一个物理量——一种荷——你可以叫它“板凳”、“桌子”，不管什么都行。人们之所以称这种荷为“色”，主要是因为它的某种性质类似于我们日常语言中的颜色的某种性质。

基本的夸克场具有一种局域规范对称性。QED 理论中，如果我们引入一个能传递相位信息的无质量规范场，就可以随便地选取不同时空点的相位，而保证大自然的性质不发生变化。同样的，QCD 理论中，在引入一个能传递色信息的无质量规范场的情况下，我们也可以随便地选取不同时空点的色，而保证大自然的性质不发生变化。我们用  $SU(3)_c$  群来描述这些变换所遵从的对称性。这里的 3 指的是有三种不同的色荷，下标提醒我们这种对称性是色（英语中的 color）交换下的对称性。与该规范场相对应的量子粒子为胶子。就像电磁场中的光子是在带电粒子中传递电磁力一样，胶子是在夸克之间传递强力的粒子。

## 色

物理学家们初次引入色这个概念的理由与强相互作用毫不相干。初衷只是寻找一种走出盖尔曼提出的强子夸克模型的困境的办法。根据夸克模型的原始版本，某些重子中有大于一个的夸克处于相同的态。比如，组成重子  $\Delta^{++}$  的三个 u 夸克就



处于相同的量子态上，但是不相容原理却告诉我们不可能有两个及以上的全同费米子处于相同的量子态上。那这是怎么回事呢？要是夸克有一种新的性质——色——则  $\Delta^{++}$  的三个 u 夸克就处于不相同的量子态上了：一个夸克是红的，一个夸克是绿的，而另一个则是蓝的。于是这三个夸克就不再是全同粒子了，也就不需要再用不相容原理了。

$\Delta^{++}$  总的色荷为一单位的红，一单位的绿及一单位的蓝。如果这些色是我们日常生活中的颜色，则我们就知道  $\Delta^{++}$  的色应该是白色。也就是说， $\Delta^{++}$  是无色的。物理学家们早就知道自然界一条可能的基本原理：**所有的可观测粒子都是无色的**。这个原理为出现在加速器实验中的粒子为什么只能是夸克的组合提供了一种很好的解释。我们可以有三个夸克的无色组合（等量的红绿蓝），可以有无色的三个反夸克的组合（等量的反红反绿反蓝），我们也可以有无色的正反夸克的组合（红与反红，绿与反绿，蓝与反蓝）。所有这些都意味着，我们能够看见重子、介子及其反粒子——所有观测到的强子。但是诸如两个反夸克或一个夸克加三个反夸克这样的组合不可能构成无色态——确实，我们从未观测到这样的夸克组合。

量子色动力学 (QCD) 是描述夸克和胶子相互作用的理论。

量子色动力学诞生后迅速成为物理学家们用来理解强子相互作用的**最佳理论**。如同量子电动力学一样，我们仍然可以使用费曼图来进行量子色动力学的计算。例如，表示夸克之间的色相互作用（再加上其他的一些东西，就可以将夸克束缚于强子之内）的费曼图如图 44 所示。

图 44 看起来很像 QED 理论中的电子对散射。这张图中是

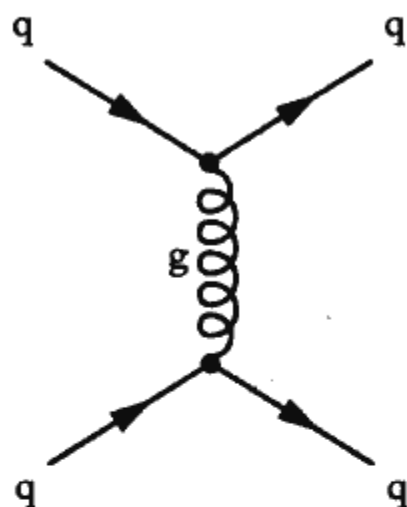


图 44 夸克与夸克的基本相互作用

两个人射夸克通过交换胶子形成两个出射夸克。所以若我们能够计算出将夸克束缚于强子之中的各种图的贡献，那么我们就能够搞清楚关于强子的一切内容。我们也可以了解这些力的剩余作用，这些剩余作用就是将质子和中子束缚于原子核内的力，总之，如果那样的话就太了不起了。不过令人遗憾的是，情况并没有那么乐观。QED 中的过程与 QCD 中的类似过程有三个至关重要的区别。

首先，QED 中只有一种电荷存在。尽管电荷可正可负，但是只要有一个数就可以区别不同的电荷了。这就意味着电磁场中只有一种传递相互作用的量子粒子——光子。从数学的角度来看，这是描述量子电动力学对称性的规范群是  $U(1)_{EM}$  的直接结果。但是色荷却有三种不同的类型。描述量子色动力学对称性的规范群是  $SU(3)_c$ ，在数学上，这意味着这种对称性将导致胶子有八种，而且所有的胶子都带有色荷。胶子是色荷

与反色荷的有趣混合。当一个夸克吸收一个胶子的时候，夸克的色将会发生改变（尽管夸克的味不变）。例如，一个带有红色荷的 d 夸克发射一个带有反红色荷的胶子时，可能转变为一个带有蓝色荷的 d 夸克。

量子力学告诉我们，夸克不能有一个永远不变的单色荷。很短的时间内，夸克就有可能发射或吸收胶子，因而时不时的就会改变色。图 45 中所示的就是强子中的夸克是如何不停地改变色荷的。

胶子本身也带有色荷，因而胶子本身也受强相互作用的影响。也就是说，胶子本身也可以与其他的胶子交换胶子。所以理论上允许无色的纯胶子束缚态（称为胶球）和胶子、夸克及反夸克的无色束缚态（称为混杂介子）存在。很明显，相比于 QED，QCD 是一个相当丰富的理论；但同时，这也意味着 QCD 是一个很难的理论。

92

## 胶子的色

有六种胶子可以改变夸克的色。红-反绿胶子将一个红夸克变为一个绿夸克；红-反蓝胶子将一个红夸克变为一个蓝夸克；绿-反红胶子将一个绿夸克变为一个红夸克；绿-反蓝胶子将一个绿夸克变为一个蓝夸克；蓝-反红胶子将一个蓝夸克变为一个红夸克；蓝-反绿胶子将一个蓝夸克变为一个绿夸克。除此之外，还有两种不同的胶子，它们与夸克相互作用时不改变夸克的色。

第二个困难是强相互作用的耦合常数  $\alpha_s$ ——按原子核物理

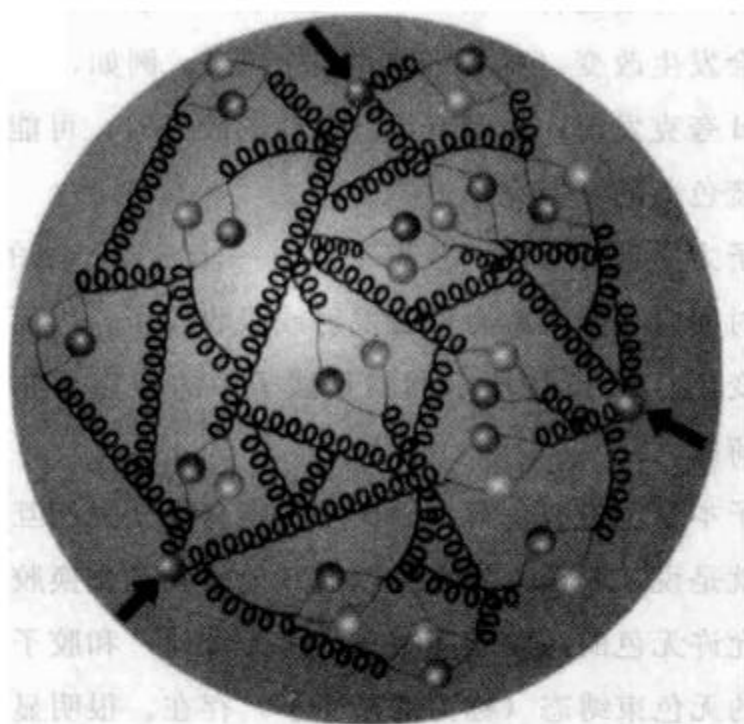


图 45 质子有三个“价”夸克（图中箭头所示）。通过交换胶子，这些价夸克被束缚在质子中；发射或吸收胶子可以改变夸克的色，但是整个质子仍然是色中性的。胶子可以在很短的时间内变成正反夸克对，当然，正反夸克对也可以重新组成胶子。所以，质子并不仅仅由三个夸克组成，充斥其中的还有大量短寿命的粒子泡

的实验推断——应该大于 1。这一点是理论的一个主要困难。别忘了根据费曼图，每个顶点的大小是正比于耦合常数的平方根的。QED 理论中，耦合常数很小，故而每一阶的费曼图的贡献都要小于前一阶，我们很快的就可以逼近结果。而在 QCD 理论中，每一阶的费曼图的贡献都要大于前一阶，于是结果就会发散。微扰论不再起作用。

93

幸运的是，关于这个问题还是有一个办法的——至少在某

些情况下是有办法的。

重正化的一个结果就是耦合常数依赖与我们进行测量时的能量大小。物理学家们因此提出了跑动耦合常数这一概念。比如，当我们说 QED 的精细结构常数  $\alpha$  是  $1/137$  时，我们实际上是说，在低能区域，该值为  $1/137$ 。如果我们的实验是在高能区域，我们就会测到一个稍微大点的精细结构常数。强相互作用的耦合常数也依赖于我们测量时的能量；不过强相互作用耦合常数的跑动比电磁相互作用耦合常数的跑动更快，而且，方向相反。在典型的原子核能量尺度上， $\alpha_s$  大于 1，微扰论失效。但是在高能区域，我们在比质子尺度小很多的距离上探测时， $\alpha_s$  会比较小。所以，强子中夸克之间的作用力实际上是非常小的；夸克似乎完全自由，我们也可以自由地使用微扰方法进行计算。QCD 的这种性质就是著名的渐近自由，这种性质允许我们在强子物理中某些感兴趣的区域使用微扰论。[正是由于发现了渐近自由，量子色动力学才被普遍地接受为描述强相互作用的正确理论。普林斯顿大学的戴维·格罗斯 (David Gross) 与弗兰克·维尔切克 (Frank Wilczek, 图 46) 发现了 QCD 的渐近自由；哈佛大学的戴维·普利策 (David Politzer) 在荷兰物理学家赫拉尔杜斯·特霍夫特 (Gerardus 't Hooft) 所发展的框架下也独立地发现了渐近自由。]

仅在夸克之间间距较大时，夸克之间的力才变得很大，并且微扰论失效。就像夸克之间存在一种将它们绑在一起的弹性胶带：如果夸克互相靠得很近则胶带很松，彼此之间只有很小的力，但是一旦夸克之间的距离变得很大，胶带就会被拉紧，

94

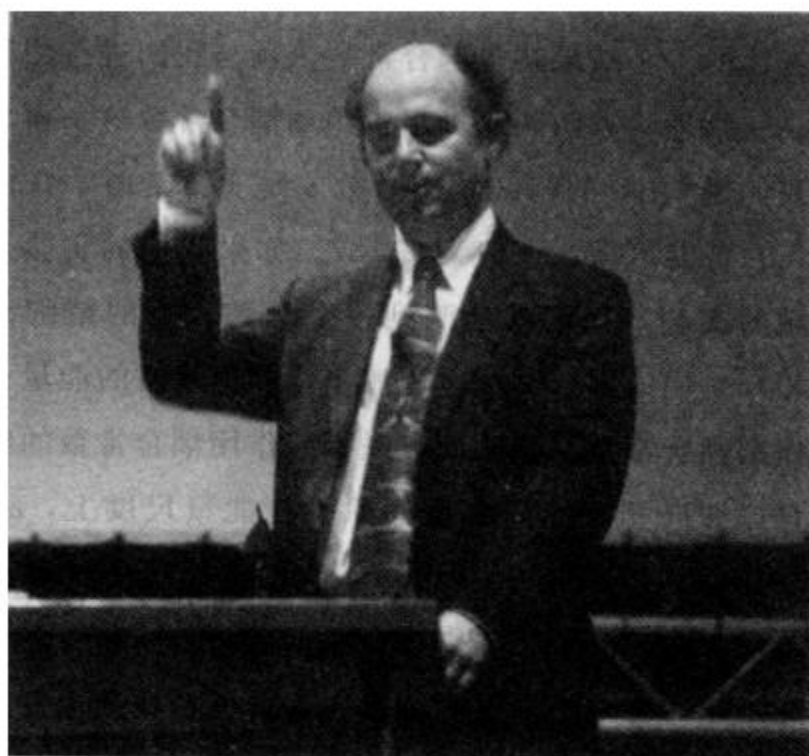


图 46 弗兰克·维尔切克是麻省理工学院（MIT）的物理学教授。与戴维·格罗斯和戴维·普利策一道发现了 QCD 具有的一个重要性质——渐近自由。这种性质意味着夸克之间的强相互作用力随着距离的变小而变弱；随着距离的变大而增强

而夸克之间的力就会变得很大。这就解释了为什么我们看不到孤立的夸克。假想一个高能质子对散射事例，其中一个质子中的夸克将另一个质子中的某个夸克撞飞，这个被撞飞的夸克与质子内其他的两个夸克之间的弹性胶带最终会被扯断；其结果并不是产生了一个孤立的夸克，由于胶带之中所有的能量实在是太大，以至于足够产生正反夸克对或者夸克三重态——于是结果就是质子仍然是质子，但是逃逸的夸克表现为一个介子或

重子。在一些情况下，“弹性胶带”中所具有的能量实在是太大了，以至于足以下一场强子雨。这场强子雨的动量方向将与初始时的夸克一样，所以这样产生的强子是以粒子喷柱的形式出现的。看到这些喷柱——如图 31 所示——事实上等于发现了孤立夸克。

尽管将夸克禁闭的弹性胶带理论听起来很不错并能用计算机数值模拟，然而它却不是夸克禁闭的证明。不走运的是，夸克禁闭发生在耦合常数很大微扰论失效的区域，要证明夸克禁闭我们必须要了解 QCD 的非微扰方面。但目前这已并非物理学家们力所能及——但是我们在后面几章中将会看到，在一些线索的指引下，非微扰理论正初见端倪。这些线索使我们专注于更高维度的区域及更疯狂的想法——不过我们稍后再看。

第三点区别，若没有其他夸克的参与，图 44 中所示的那种过程永远也不会发生。自然界中，能观测到的只能是无色的态，所以图 44 中的夸克必须与反夸克（即构成介子）或两个夸克（即构成重子）相伴出现。我们只能通过将夸克与反夸克束相撞来获取有关夸克的信息；永远都不会有干净的单个夸克之间的碰撞实验。这就是为什么 QCD 的分析更加困难的另一个原因。

总之，QCD 是基于  $SU(3)_c$  规范对称性的可重正化的相对论性量子场论，在某些区域我们可以使用微扰论进行计算。与 QCD 计算有关的技术问题意味着理论与实验的符合程度不能像 QED 理论那样令人印象深刻；但即使这样，我们仍有很多理由认为 QCD 就是描述强子物理的正确理论。粒子表日新月异的变化让五六十年代困扰物理学家们的迷雾渐渐散尽。深



层理论具有漂亮的简单性，尽管细节计算相当困难。

## 弱相互作用

被时间与命运搞得虚弱不堪。

阿尔弗雷德·丁尼生 (Alfred Tennyson),

《尤利西斯》(Ulysses)

弱相互作用对所有粒子，不管是轻子还是夸克都起作用。而且，弱相互作用还是唯一能改变参与相互作用过程的粒子的味的作用。假若不考虑弱相互作用的独一性和重要性，弱作用实际上是一种稀有过程。只有当强相互作用和电磁相互作用因为某种原因被禁戒时（比如守恒律使得强相互作用和电磁相互作用不能发生），我们才能观测到系统中发生了弱相互作用。如果考虑到弱相互作用的稀缺性，以及令人费解甚至有时具有与直觉相反的性质，那么就不难理解物理学家们为什么会花费了几十年时间来发展一套成功的描述弱相互作用的理论了。我们已经知道有三种基本的玻色子参与弱相互作用：带电荷的  $W^+$  和  $W^-$  玻色子（电荷大小与电子电荷的大小相同）以及电中性的  $Z^0$  玻色子。

跟以前一样，我们可以用费曼图来计算感兴趣的物理量。图 47 是典型的只有轻子参与的弱作用过程的费曼图。

$W$  玻色子既与夸克相互作用又与轻子相互作用。但它并



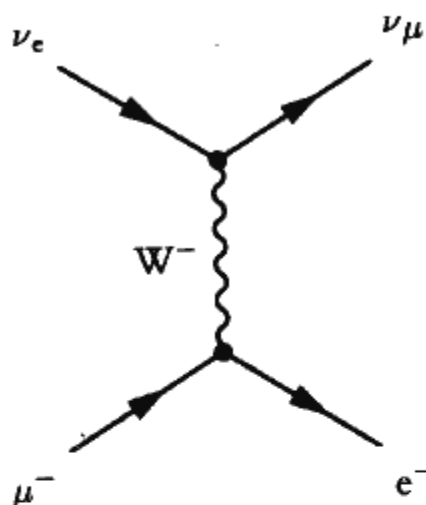


图 47  $\mu$  子与电子中微子的散射过程。入射  $\mu$  子 ( $\mu^-$ ) 与电子中微子 ( $\nu_e$ ) 交换一个  $W$  粒子，产生电子 ( $e^-$ ) 及  $\mu$  子中微子  $\nu_\mu$  出射。转动这张图，就是一个更加真实的物理过程： $\mu$  子衰变为电子、 $\mu$  子中微子与反电子中微子的过程①

不与色有耦合——那是胶子的事——因而弱作用过程中夸克的色并不改变。但是夸克在弱作用过程中会改变味。味的改变并不是像胶子带走色一样由  $W$  粒子带走味；不可能是那样的，因为  $W$  粒子也与轻子有耦合，而轻子并不带有味。所以我们可以断定在弱相互作用过程中夸克的味并不一定要守恒。典型的由两个夸克和两个轻子参与的弱相互作用过程如图 48 所示。

96

传递弱力的粒子是有质量的。 $W^+$  和  $W^-$  玻色子的质量是 81.8 GeV。而  $Z^0$  玻色子的质量为 92.6 GeV。而这就是弱相互作用看起来很弱的原因所在。

不确定原理告诉我们两个粒子要是能够交换一个大约质量

① 译者注：此图似有误。图中， $\nu_\mu$  应为  $e^-$ ； $e^-$  应为  $\nu_\mu$ 。



为 100 GeV 的虚粒子，则参与弱相互作用的基本粒子之间的距离则要求要很近——大约  $10^{-16}$  米。这是几乎不可能发生的。（并非一定不可能发生；平均来说，一个自由中子中的两个夸克每 10 分钟就会靠得足够近以至于能交换一个 W 粒子。

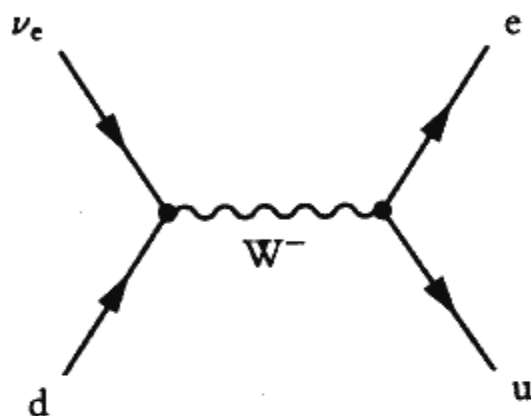


图 48 图中所示的过程为弱散射进程，其中 W 粒子与一对夸克和一对轻子耦合。我们已经知道，夸克被束缚于强子之中，所以它在图中的过程并不能直接观测到；转动这张图，并加上旁观者夸克，就可以表示中子 β 衰变的物理过程了。中子衰变过程就是通过交换一个 W 粒子，中子中的一个 d 夸克转变为一个 u 夸克，相应的中子就转变为质子了。同时，W 粒子衰变为电子及一个反电子中微子<sup>①</sup>

所以只有在高能粒子加速器上才能迫使粒子靠得够近以至于能够产生足够多的 W 玻色子与 Z 玻色子。）事实上，弱相互作用的内力一点都不小，当实验能量在 W 粒子与 Z 粒子质量附近时，弱耦合常数大概是 1/29——大概是精细结构常数的 5 倍。

弱相互作用的几个精妙之处有很重要的意义。

首先，一个自然的假定是弱作用只能改变同代夸克的味。

<sup>①</sup> 译者注：此图似有误。图中， $\nu_e$  应为  $\bar{\nu}_e$ ，箭头反向；u 应为  $\bar{u}$ ，箭头反向。

这样的假设意味着弱作用可以作用于同代的夸克比如  $(u, d)$  之间，将  $u$  夸克转变为  $d$  夸克，反之亦然。类似的，弱相互作用也可以作用于  $(c, s)$  以及  $(t, b)$  各代。但是不同各代之间的跃迁是禁戒的。可我们要指出，这样的假设是错误的。比如，有奇异数改变的弱相互作用存在；人们早就知道， $s$  夸克可以通过弱相互作用转变为  $u$  夸克。

在标准模型中这样的事情与量子力学的一个古怪性质有关。当我们考虑弱相互作用时，夸克的代就不再是  $(u, d)$ ， $(c, s)$  以及  $(t, b)$ ；而是  $(u, d')$ ， $(c, s')$ ， $(t, b')$ 。这里的'代表的夸克并不是物理上的  $d, s, b$  夸克，而是物理上的  $d, s, b$  夸克的量子组合。所以当讨论弱相互作用时，比如  $d'$  夸克，主要是  $d$  夸克，然而也会混有少量的  $s$  夸克与  $b$  夸克；对于  $s'$ ， $b'$  夸克也是同样的道理。虽然听起来有点古怪，不过在量子力学的世界中却是有意義的。这种不同代之间的混合的量的大小是标准模型中一个很重要的数。当然要是能算出这些数才好，不过目前，我们就只能从实验上测得这些数的大小，然后填回到理论中。

第二点，对一个弱作用过程来说，“手征性”的概念相当重要。考虑一个自旋为  $1/2$  以光速运动的无质量费米子，其自旋可以指向运动方向，这时的费米子是“右手性”的；自旋也可以指向与运动方向相反的方向，这时的费米子是“左手性”的；由于我们永远不能超过光速，所以手征性是守恒的量（图 49）。很长一段时间以来，中微子都被看成是无质量的，手征性的守恒当然是很自然的事。所以有“两种”中微子存在——左手中微子以及右手中微子。对于有质量的费米子，比如电

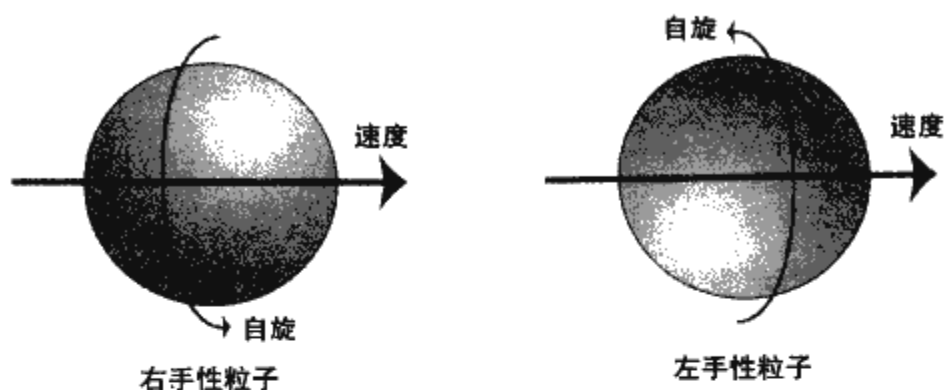


图 49 假设图中的两个粒子是无质量的，故而以光速运动。左边粒子的自转动轴方向与粒子传播方向相同，这样的粒子被称为“右手性”粒子。右图中粒子的自转动轴方向与粒子传播方向相反，这样的粒子被称为“左手性”粒子。如果我们能赶上并超过这两个粒子，然后回头去看，可能会发现粒子的自旋改变；但是我们永远也追不上光速运动的粒子，因而无质量粒子的手性是守恒的。大量的实验证实参与味改变弱相互作用的费米子总是左手性的（或者是右手性的反费米子）

子，我们就不能够这样为其分类；因为它们不能以光速运动，我们可以想象能够超过它们后回头来看，这时我们会发现它的手征性是可以改变的。量子力学效应使得一个初始时刻是左手性的电子有可能变为一个右手性的电子，反之亦然。当电子以接近于光速的速度运动时，我们可以合理地说电子具有特别的手征性。我们将这些具有特别的手征性的态称为费米子的手征态。

## 手征性

我们在对称性的那一章中曾经遇到过手征性这个词，它脱胎于希腊语中“手”这个词，这个词在科学中滋生出许多用

法。例如在植物学中，芳香的桂竹香属的正式名称是 *cheiranthus*——“手花”——起源于人们常常手捧一大束这类花的风俗。在非科学领域中也会出现这个词的影子：手相术就是根据手来看命运——也就是常说的“看手相”。物理学世界中，手征性总是与某个东西是左手性还是右手性有关。

令人惊奇的是，自然界的一个很重要的法则是：**弱相互作用玻色子只与左手性的费米子有耦合**（或者说是右手性的反粒子）。因此任何一个弱相互作用的相对论性理论必定是一个手征理论。如先前提到过的，这一法则的发现震惊了物理学家们。物理学家们一直以来就自然地假定大自然遵从镜像变换的规则：他们认为如果将空间做一个镜像反演，物理定律不会发生改变。对于强相互作用和电磁相互作用来说，这一点确实不假；但是如果你观测的是弱相互作用的镜像变换，大自然对待左和右的态度相当不同，它更喜欢左。

所以当我们考虑的是弱相互作用时，粒子的代与我们所期望的会有一点不同。参与弱相互作用的三代轻子是  $(e, \nu_e)_L$ ， $(\mu, \nu_\mu)_L$ ， $(\tau, \nu_\tau)_L$ ，下标代表所有的这些态都是左手态，参与弱相互作用的三代夸克为  $(u, d')_L$ ， $(c, s')_L$ ， $(t, b')_L$ ；下标仍然代表这些夸克为左手夸克，撇代表这些夸克为物理上的夸克的混合。

虽然这些看起来使人迷惑，但这是使物理学家们那堆积如山的实验数据有意义的唯一方法。手征性具有非常关键的重要性：保证大自然的低能理论具有手征性是对那些想发展统一的物理理论的物理学家们一个很强的限制。



FIRST MOVER

第一推动

99

## 电弱统一与希格斯粒子

连生在一起。

威廉·莎士比亚 (William Shakespeare),  
《仲夏夜之梦》(A Midsummer Night's Dream)

我们可以用玻色子的交换来理解三种基本的相互作用。对这些理论的这种最基本的理解使得我们有希望将这三种基本相互作用进行统一。事实上，在这个方向的推进几十年之前就已经开始了：物理学家们已经统一了电磁相互作用和弱相互作用。

电磁相互作用和弱相互作用是两个完全不同的怪兽。电磁场只与带电荷的粒子有耦合；而弱相互作用对所有的粒子都起作用，甚至包括电中性的中微子。电磁力是一种长程力，在很远的距离上都能起作用；而弱相互作用是一种短程力，作用范围甚至不能超出原子核的范围。电磁力不能区分左手与右手；而弱相互作用具有手征性。当然还有其他的一些区别。尽管如此，物理学家们仍然在很久以前就认为在这两种理论下面潜藏着一个深层次的理论，这个理论可以将这两种看似不同的相互作用联系起来。事实上早在 1961 年，美国物理学家谢尔顿·格拉肖 (Sheldon Glashow) 基于早前与其导师朱利安·施温格——QED 的建立者之一——的合作，就已经说明我们应该如何将这两种力看成是统一的电弱相互作用的两个不同方面。

格拉肖理论的出发点是已经在 QED 方面取得巨大成功的

局域规范对称性。要统一两种相互作用，我们就要找到适当的“荷”，以便将两种规范相互作用统一成一种相互作用的量子场论。

首先考虑弱相互作用粒子的左手二重态。比如  $(e, \nu_e)_L$ ，电子及其中微子（我们也可以选取其他的 5 种二重态，总之都是一样的）。如果有适当的规范粒子参与进来，则我们在任意时空点“交换”这些粒子，世界在这种交换下将会具有不变性。这种情况类似于 QCD 理论中有胶子参与的时候，我们可以“交换”一个红夸克和一个绿夸克。

描述这种两个物体可以彼此转动的变换的数学语言是  $SU(2)$  对称群。在我们讨论的问题中，我们将这个对称群称为  $SU(2)_L$ ，下标用来提醒我们所处理的为左手粒子。这里的弱作用中“转动”的量被称为弱同位旋。我们可以将这个量想象成与这对粒子有关的箭头。在  $(e, \nu_e)_L$  二重态中，如果箭头向上，指的粒子就是电子，如果箭头向下，指的粒子就是中微子。只要信使粒子——规范玻色子——能够传递选择的信息，我们就可以随便地选择箭头的方向。

100

## SU(2) 群

$SU(2)$  群可以用来描述两个物体的彼此转动。比如在量子力学中有自旋为  $1/2$  的粒子：粒子沿  $z$  轴要么向上自旋要么向下自旋；在描述这样的粒子时  $SU(2)$  群就有了用武之地。这个群也可以用来描述同位旋——早期的强相互作用中一个很重要的概念。人们以前将质子和中子看成是一种被称为核子的实体的两种不同的态；同位旋朝上的核子是质子；而同位旋朝



下的核子是中子（这也是上夸克和下夸克名称的由来）。同位旋与自旋毫无关系，但其基本的数学结构都是用  $SU(2)$  群来描述的。对于弱作用来说，我们可以用**弱同位旋**的概念。（弱同位旋与自旋和同位旋都毫无关系。想必读者们已经注意到了，物理学家们在命名时实在太懒惰了。）关键在于这三种情况中内在的数学结构是一致的，同样地，粒子的左手二重态也是由  $SU(2)$  群来描述的。

另一个我们需要考虑的量是**弱超荷**，用字母  $Y$  来代表，这个荷与电荷有关。不论是轻子还是夸克都有弱超荷的值；右手的  $\tau$  弱超荷为  $Y = -2$ ；而对于右手中微子来说， $Y = 0$ 。我们可以改变每点的弱超荷的取值，但是这时候我们就必须引入一个规范玻色子来传递这种改变的信息。描述弱超荷的相位转动的对称群是  $U(1)_Y$ ，下标提醒我们现在讨论的不是电磁场的  $U(1)$ 。荷与超荷在数学上的意义是相同的，在物理上略有不同。

格拉肖研究的理论就是基于这两个群的乘积—— $SU(2)_L \times U(1)_Y$ ——的局域规范理论。如早前提到的那样，局域规范理论要求有无质量规范玻色子存在。与  $SU(2)_L$  对应的是三个这样的规范粒子——我们将其分别称为  $W^+$ 、 $W^-$  和  $W^0$ 。 $U(1)_Y$  所对应的规范粒子称为  $B^0$ 。量子力学世界的规则允许  $W^0$  与  $B^0$  混合构成两个不同的无质量粒子——正是  $Z^0$  与  $\gamma$ 。（混合的大小用“弱混合角”表示——这是标准模型中必须用实验测量，然后填回到理论中的又一个数。）所以  $SU(2)_L \times U(1)_Y$  理论



中有四个无质量的规范粒子，分别为  $W^+$ 、 $W^-$ 、 $Z^0$  与  $\gamma$ 。但在这里，我们还不能对这些粒子使用我们熟悉的那几个名字。在这种特别选取的对称性——弱同位旋与弱超荷的局域对称性下，我们已经将四种规范粒子分成三种弱作用玻色子和光子了。换句话说， $SU(2)_L \times U(1)_Y$  已经为我们提供了一个关于电磁相互作用和弱相互作用的整体理论！两组群的两个不同的耦合常数分别对应于两种不同的相互作用；所以在耦合强度上不能够统一。但是我们已经获得了描述两种相互作用的统一框架；我们已经有了—种能够用两种方式展现自己的相互作用。

也许这是自 1865 年詹姆斯·克拉克·麦克斯韦发表其证明电力和磁力只是统一的电磁力的两个不同方面之后，通向统一之路的最重大的进展。但是要注意的是，在格拉肖的理论中，有一个不可忽视的问题：所有的规范粒子都是无质量的。光子当然是无质量的，不过格拉肖清楚地知道，其他的三个传递者必须是有质量的，只有这样才能解释弱相互作用是一种短程力。格拉肖不能解释为什么只有光子是无质量的玻色子；他只是简单地提到“这是一块我们必须跨越的绊脚石”。

格拉肖理论中的问题是对称性实在太多了。如果  $SU(2)_L \times U(1)_Y$  对称性精确成立，必然会导致所有的规范粒子都是无质量的。而这并不能如实地反映出我们的世界。1967 年，阿卜杜斯·萨拉姆 (Abdus Salam, 图 50) 与史蒂文·温伯格各自独立地证明这个理论既可以保持其深层次的对称性又可以使规范粒子获得质量，其基本想法是理论中的部分对称性发生自发破缺——“自发”的意思是理论的对称性自然地破坏掉。

对称性的自发破缺并不神秘。物理学中有很多这样的例



图 50 阿卜杜斯·萨拉姆（左）与史蒂文·温伯格为我们揭示了自发对称性破缺机制是如何赋予弱相互作用玻色子质量又同时保持光子无质量的。他们证明了谢尔顿·格拉肖的电弱统一理论是可行的。这三个人由此分享了 1979 年的诺贝尔物理学奖

子。将一根吸管放在你的两掌之间，你就成了一个可以用具有旋转对称性的方程描述的物理系统了。合拢你的双掌会使吸管变弯，对称性就破缺了。你根本不能预计你的吸管是如何弯的；可以“上弯”，“下弯”，“侧弯”，怎么样弯都有可能。这个不对称的系统，是具有完美对称性的方程的稳定解。又如考虑我们在前面的章节中讨论过的水的例子：一桶水具有高度的转动对称性——不论从哪个角度看它都是一样的。但是如果我们将水冷却到结冰——用物理学的行话来说就是发生了相变——则转动对称性就会破缺，因为冰具有晶体结构。从不同角度

102 角度看，冰是不一样的。这是一个重要的观点：当物理系统发生相变时，系统的对称性就会破缺。对称性破缺的最好的例子

是铁磁系统。铁磁就是具有杂乱无章的磁场方向的相互作用的离子的集合体。其总能量的方程具有转动对称性；磁化指向不同的方向，因而没有净磁场。但是铁磁处于最低能量态时，所有的磁化指向同样的方向；转动对称性自发破缺。将磁铁加热到临界温度之上，磁化方向发生扰动，铁磁发生相变；磁场消失对称性恢复。再次冷却到临界温度以下，对称性再次破缺；所有的磁化指向相同的方向（其精确方向具有随机性），铁磁再次获得磁场，见图 51。

萨拉姆与温伯格将希格斯场引入标准模型作为引入对称性自发破缺的机制。[该场根据英国物理学家彼得·希格斯（Peter Higgs，图 52）命名，希格斯是在物理学中最早从事对称性自发破缺方面的工作的物理学家。当时研究类似的场论中对称性破缺问题的物理学家还有比利时的罗伯特·布劳特（Robert Brout）及弗朗哥斯·恩格勒特（Francois Englert）等人，美国的菲利普·安德森（Philip Anderson）进入这个领域更早。]

103

假如真的存在希格斯场的话，它会弥漫于整个空间并且与所有的基本粒子都有耦合。正是希格斯场与格拉肖的电弱理论中  $W$  粒子和  $Z$  粒子的耦合使得这两个粒子获得质量。回忆一下，在前面的章节中我们曾经讨论过的自旋为 1 的无质量玻色子，它有两个自由度，即两个横向极化分量。而自旋为 1 的有质量玻色子，则有三个自由度：两个横向极化分量以及一个纵向极化分量。希格斯机制提出存在一个有四个物理极化分量的基本场。当这个基本场与  $W^+$  玻色子相互作用时， $W^+$  玻色子就会“吃掉”它的一个极化分量从而变成有质量的粒子；同样的， $W^-$  玻色子就会“吃掉”它的另一个极化分量从而变成有

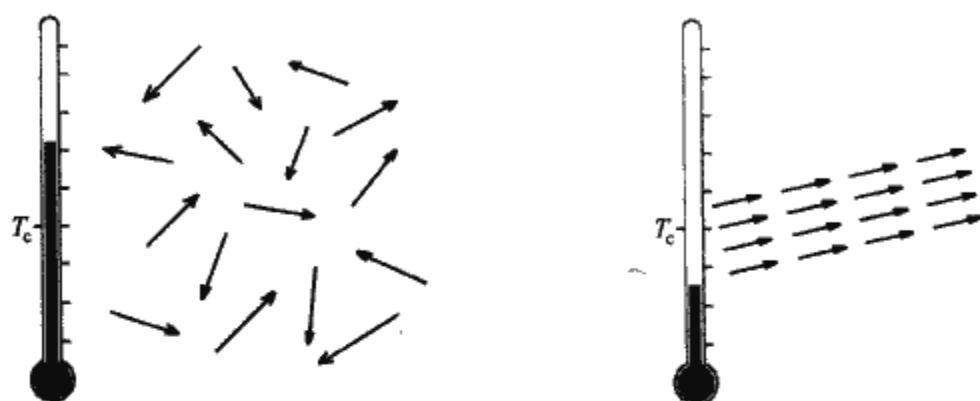


图 51 左图：临界温度以上，铁磁物质中的磁化取向杂乱无章。在这个具有转动对称性的系统中，没有净磁场存在。右图：一旦温度低于临界温度，磁化的取向就会一致。这就意味着转动对称性破缺，磁场产生。场的方向具有随机性：再次加热临界温度以上的铁磁物质，磁场就会消失，再次冷却后的磁场不会保持原方向

质量的粒子； $Z^0$  玻色子就会“吃掉”它的第三个极化分量从而变成有质量的粒子。而拒绝参加这场盛宴的光子仍然无质量。那么原来的那个基本场呢？它就会只剩下一个极化分量——也就是一个标量场（即自旋为零的玻色子）。这就是所谓的希格斯玻色子（符号  $h$ ）。

我们有必要换种说法重复一下这个精妙的概念。电弱相互作用理论具有  $SU(2)_L \times U(1)_Y$  的对称性，因此有四个无质量的规范玻色子。这些玻色子与弥漫于整个宇宙的所谓希格斯场发生相互作用时，理论的对称性发生破缺。三个规范玻色子（ $W^+$ 、 $W^-$  与  $Z^0$ ）获得质量；第四个规范玻色子（ $\gamma$ ）仍然无质量；另外剩下一个有质量的标量玻色子（ $h$ ）。

希格斯机制可以赋予所有的基本粒子以质量。在空间中川流不息的夸克和轻子与希格斯场相互作用；于是粒子邻近的场

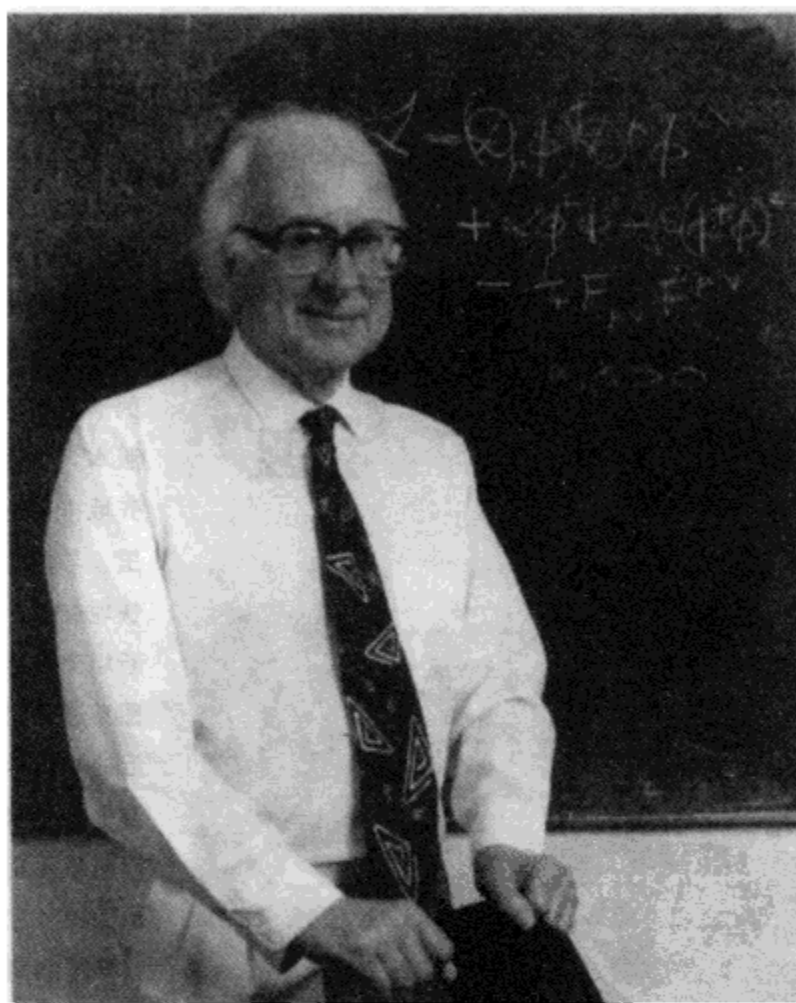


图 52 彼得·希格斯为爱丁堡大学的名誉退休教授。由于在场论中的杰出工作而获得多项荣誉；特别是 2004 年与罗伯特·布劳特及弗朗哥斯·恩格勒特分享沃尔夫奖（除诺贝尔奖外的物理学最高奖）

会变得扭曲，从而这些夸克或是轻子就会获得质量 [图 53 是衍生于戴维·米勒 (David Miller) 的灵感的一幅解释希格斯机制的漫画]。所以，我们常常会听到这样的说法：粒子具有质量这一客观事实可以用希格斯机制来加以解释。当然实际情况要比我们说的这些稍微复杂些：我们已经看到，质子的质量



图 53 1993 年，英国科学大臣向物理学家们提出一项挑战：用一页 A4 纸讲清希格斯机制。戴维·米勒用一个政治类比脱颖而出；这里的卡通画是其物理学版本。物理学家们整齐地排在一间大屋子里，与最临近的人愉快地交谈；这时爱因斯坦突然走了进来试图穿过房间，在他附近的物理学家都试图与他们的英雄交谈，因而爱因斯坦被困在房间中了。当爱因斯坦穿过房间之后，骚动的人群才安静下来，各归各位（米勒版的这个例子中，场景是参加保守党党员鸡尾酒会的玛格丽特·撒切尔）。类似地，基本粒子与弥漫于整个空间的希格斯场相互作用；希格斯场的局域波动使得粒子获得质量

主要来源于将夸克束缚于其中的能量而不是简单的夸克质量之和。但是基本粒子的质量却是来源于希格斯机制，在这层意义上，我们上面的说法是正确的。

于是，到 1967 年的时候，物理学家们就拥有了统一的电弱理论。之后不久，1971 年，荷兰物理学家赫拉尔杜斯·特霍夫特证明了电弱理论的可重正性。就像 QED 一样，电弱理论计算中出现的无限大也可以一扫而空；电弱理论能够对你提出的问题给出定义明确的答案。从此，电弱理论脱颖而出。

电弱理论以及 QCD 理论所取得的一系列巨大成功帮助标准模型迅速站稳了脚跟，成为我们所拥有的关于微观世界的最佳理论。标准模型实际是由两块截然不同的理论组成，不过这两块理论都基于局域规范对称性的思想。由 QCD 描述的强相互作用基于  $SU(3)_C$  对称性；电弱理论则基于  $SU(2)_L \times U(1)_Y$  对称性。故而，很多物理学家常常将标准模型简称为  $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ 。

106

格拉肖、萨拉姆与温伯格的成就可以与麦克斯韦的电力与磁力统一理论比肩。但是这巨大的成就是在付出了一定的代价下取得的，这一代价就是在标准模型中引入了一个多余的基本粒子：标量希格斯玻色子。在本书完成的时候，实验中仍然未能观测到希格斯粒子的存在（图 54）。希格斯玻色子是一条仍未现形的纽带，也是标准模型中唯一有待实验证明的部分。

## 希格斯玻色子的质量

一些线索表明位于 CERN 的 LEP 或许会在 2000 年时探测到希格斯粒子，不过实验仍未证实（本书中文版出版之时，

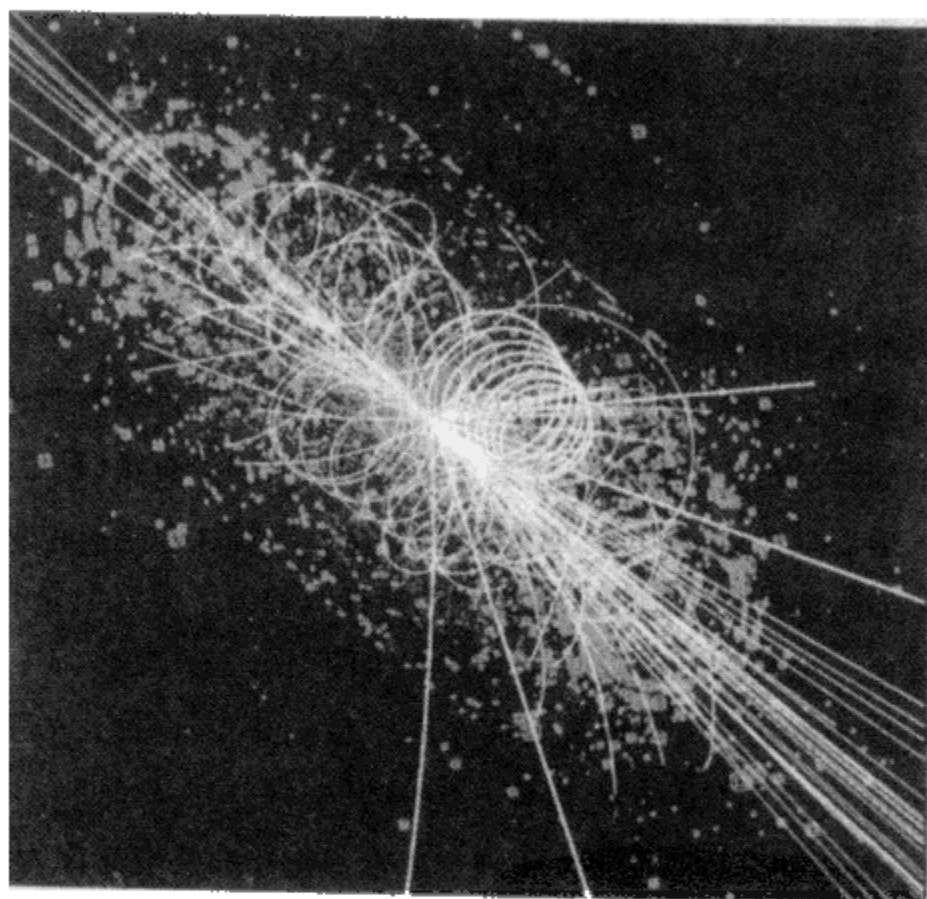


图 54 现今的物理实验仍然没有观测到希格斯粒子，不过物理学家们已经知道了他们应该到哪里寻找希格斯粒子。该图是计算机模拟的在大型强子对撞机上可能的希格斯粒子产生信号，图中是两个质子碰撞产生一个希格斯玻色子，希格斯玻色子衰变成四个  $\mu$  子的过程。大型强子对撞机的 CMS 探测器将会探测到这样的过程

LEP 已经被拆卸，用以安装 LHC，所以在 CERN 发现希格斯粒子的重任只能留待 LHC 完成）。不过我们仍从 LEP 获得了一些有价值的信息，根据 LEP 以及其他几台对撞机的数据，希格斯粒子的质量至少应大于 114 GeV；理论上，希格斯粒子的质量不可能大于 250 GeV。所以，当 2007 年 LHC 投入运行



的时候一定能够发现希格斯粒子。当然，前提是它真的存在。

我们关于宇宙的看法是有一定谬误的，究其原因则是由于我们生活在一个低能世界。我们在这个低能区域所能见到的是两种分离的力：电磁场与弱相互作用。而真正的宇宙并非仅仅如此，在大爆炸后的最初时刻，宇宙的温度远远大于今天的温度。如果我们追随电弱相互作用和电磁相互作用向后推演，我们就会发现宇宙经历过一次相变。相变之前，大约是宇宙大爆炸之后的  $10^{-11}$  秒之前，宇宙拥有电弱理论完整美丽的对称性：电磁相互作用与弱相互作用统一于单独的电弱相互作用。今天我们只能在高能对撞机的实验中看到这种对称性。也许这就是我们从“井底”向天的那初次一瞥：宇宙起源于更加简单更富于对称性的状态。可是今天的宇宙已耄耋老矣。冰凉的空间中美丽的对称性已时时残缺。物理学家们顽固地追寻着那最初的简单性与美，细微的踪迹将他们引向那疯狂而无所顾忌的奇思妙想。我们即将踏上旅程共同领略沿途风景。

107

## 标准模型的成功

永恒美好之物，便是成功之事。

拉尔夫·沃尔多·爱默生 (Ralph Waldo Emerson),  
《命运》(Fate)

前面我曾经提过，标准模型是“我们的最佳理论”。下面就是我的五点理由。



首先，正如人们预料的那样，标准模型中的所有的基本场都已经被发现，并且其性质也被精确测量过。唯一的例外就是希格斯场，不过假如真实存在的话，LHC 将在几年之内发现它（假如实验的结果是希格斯场并不存在，那也并非是对标准模型的致命打击；仍有许多其他的破缺电弱对称性使粒子获得质量的方式。不过这样的话，理论的常规公式可能会需要一些修改）。标准模型成功地预言了很多粒子及其性质。比如，物理学家们早在顶夸克实验发现之前的很多年，就已经知道了应该到哪里找到顶夸克，并且成功地预言了它的很多性质；另一方面，人们从未发现一个不属于标准模型的基本场。

第二，令五六十年代的物理学家们倍感迷惑的亚原子“粒子”动物园已经不再是个问题了。这些粒子曾一度被认为是基本粒子，现在这种看法已经得到纠正：这些粒子只是基本粒子按满足标准模型限制的方式组合的束缚态。人们从未发现一个被标准模型禁戒的亚原子粒子存在。比如，人们从未观测到奇异数为 5 的重子或者是粲数为 3 的介子存在。

## 标准模型中的其他粒子

标准模型，或者其最小的扩充版本中，可能存在尚未被观测到的粒子。比如，轴子。

QCD 的一个未被解决的疑难是为什么理论具有 CP 对称性。CP 对称性指的是，在粒子与反粒子变换（这种变换称为电荷共轭变换，符号 C）以及左右互换（这种变换意味着我们从镜子中观测我们的世界，被称为宇称变换，符号 P）的联合变换下，我们的世界不发生改变。弱相互作用破坏 CP 对称

性，因此人们自然期望强相互作用也是 CP 破坏的。然而实验表明强相互作用是具有 CP 对称性的。<sup>①</sup>

1978 年，海伦·奎因（Helen Quinn）与罗伯特·派西（Robert Peccei）为标准模型引入一种新的数学对称性，称为轴对称性。轴对称性会自然地压低强相互作用理论的 CP 破坏效应。因为实验上没有观测到这种对称性，所以轴对称性也必然自发破缺，结果就如同电弱对称性自发破缺时产生一个自旋为 0 的希格斯粒子一样，轴对称性的自发破缺产生一个自旋为 0 的玻色子——轴子。（轴子延承了物理学家们惯用的简陋命名方式，其名称来自于一种洗衣粉品牌。）假如轴子存在的话，那它将具有很轻的质量——也许比中微子的质量还轻——并且会像中微子一样只有微弱的相互作用。很多实验组从事搜寻轴子的实验，但是至今一无所获。

假如最终发现轴子，它将和谐地加入标准模型的框架。不过，近来的一些工作也提出了一些不用轴子就可以解决强 CP 问题的办法。

标准模型的成功之处在于它成功地预言了所有已知粒子的性质，以及它们之间的相互作用。然而，标准模型并不是一个完整的理论，它仍然存在着许多未解之谜。

第三，物理学家们的一项任务是使用理论计算可观测的物理量，比如截面（可以反映出粒子之间散射的可能性）以及衰变率（粒子在衰变到较轻的粒子之前的典型时间长度）之类。

---

① 译者注：华裔物理学家杨振宁和李政道于 1956 年提出弱相互作用下宇称不守恒，随后被另一位华裔女物理学家吴健雄领导的实验组最早验证。这一发现具有非凡的物理意义，之前物理学家们一直想当然地认为一个守恒律是对所有的相互作用都一样的，这一发现强烈地改变了物理学家们的观念。1957 年，杨、李两人获得诺贝尔物理学奖，其时杨振宁 35 岁，李政道 31 岁。



标准模型的电磁相互作用部分，理论与实验的比较取得了巨大的成功。如同我们在第四章“标准模型之外的物理线索”文字所示，磁场中的电子运动有关的计算直到小数点后面 10 位都可以与实验符合得很好。只要理论能和实验符合，那我们便做对了一些事。相较而言，标准模型的 QCD 部分的计算极为困难，而实验也常常是一团乱麻，不过即使这样，理论和实验仍然可以在一定程度上彼此符合。

第四，在过去的半个世纪，粒子加速器上积累了数以万亿计的实验事例。在如此巨大的数据之中，没有一例与标准模型相冲突。（2004 年 3 月，布鲁克海文国家实验室的一组物理学家宣称他们可能观测到了标准模型之外的物理效应。他们详细地审查了 K 介子衰变的 7.8 万亿个事例，根据标准模型，K 介子衰变到一个  $\pi$  介子及中微子反中微子对的概率为 130 亿中有一个事例，然而，这个实验组观测到了三个这样的稀有事例，这意味着每 70 亿次衰变中就会有一个这样的事例。这也许就是有新物理的效应的信号——但就如许多此类新物理信号的实验声明一样，仍有待进一步的实验积累更多的数据后才能下肯定的结论，三个事例或许就是统计上的侥幸而已，不足为信。）

第五，标准模型仅仅基于很少的几个基本原理：由量子力学和狭义相对论组成的量子场论；局域规范对称性理论（其电弱段的对称性将发生自发破缺）；理论是可重正化的要求。从这些基本原理可以流畅地得出标准模型。除非在一些受到限制或很好理解的条件下，否则所有这些都使得修补标准模型变得很困难。模型必须是这样的结构，因为其所依据的几条基本原

理只有很少的几种组合方式。

看起来，在标准模型的帮助下，我们正在通向终极理论的康庄大道上，能够解释我们所要知道的一切以及这个宇宙的基本方面的终极理论似乎正向我们招手。然而，标准模型固然很好——但并非无可挑剔。回头审视标准模型的发展与成功，很快你就会觉得，标准模型必然会被一些更好的理论所取代。

## 标准模型并非终极理论

我们遭遇的只是一种条件——并非一种理论。

格罗弗·克利夫兰 (Grover Cleveland),  
《1887 年度消息》(*Annual Message, 1887*)

乍看之下，标准模型中真正的基本粒子数量相当的少：一代轻子 ( $e, \nu_e$ ) 以及夸克 ( $u, d$ )；以及不知道为何有必要复制的另两代。这些基本粒子之间的相互作用可以由 QCD 理论及电弱理论很好地描述，而且这两种理论本身都基于美妙的规范对称性思想。看起来，所有这些作为终极理论的根基都再合适不过了。不过，它真的那么合适吗？

110

或许你会合理地争辩道：基本粒子的数目实在太多了，共有六个轻子，而且每一个都有其反粒子，相当于总共有 12 个之多。还有六种夸克，每一个再有三种色，共有 18 个夸克，加上反夸克，足有 36 个那么多。再来看下传递相互作用的规范粒子：一个光子，三个弱相互作用粒子再加上八个胶子——所以总共也足有 12 个了（规范粒子本身就是自己的反粒子）。



而且至少还有一个希格斯粒子（在一些理论版本中有更多的希格斯粒子）。这么看来，标准模型中总共包含了足足 61 个基本粒子，有这样数目基本粒子的终极理论，看起来无论如何都令人不舒服。

比粒子数目更糟糕的是，所有的这些粒子的质量都需要“用手”放到理论中。换句话说，我们不得不先从实验上测出粒子的质量，再把它们添到理论中去。标准模型本身并不告诉我们这些质量应该是多少。假如费米子的质量有些明显的规则，我们感觉或许会好些，但是我们却一无所知。 $t$  夸克的质量极大（大约 180 GeV）；而电子的质量很小（0.511 GeV）；中微子的质量更是小得可怜（图 55 形象地给出了标准模型中不同粒子质量的相对大小）。事实上，我们是知道质量的起源的：正是不同的费米子与希格斯场的耦合常数赋予不同的费米子以不同的质量；但是因为我们无法计算这些耦合常数的大小，所以我们没办法知道这些质量到底应该是多少。希格斯粒子的质量应该在 114~250 GeV，因此我们只能认为在所有的费米子中，只有  $t$  夸克具有“自然的”耦合常数。那么我们当然就要问，为什么其他的费米子的耦合常数这么的小？很遗憾，标准模型对此继续保持缄默。

还有其他各种参数，比如其他的一些耦合常数和混合角等，也全都必须“用手”放到理论中。一个真正的终极理论应该给出部分参数的值，在很理想的情况下，甚至应该给出全部参数值。

还有许多其他标准模型无法作答的问题，有的具有普遍性，有的只是特殊的问题。这里只给出一个例子：在除质量外

的其他方面几乎全同的费米子为什么会有三代？布鲁斯·霍恩斯比（Bruce Hornsby）的歌中唱道“本来就是那个样”，在生活中这样的回答或许令人能够勉强接受，但对于物理学的终极理论来说，这样的回答完全不能令人满意。

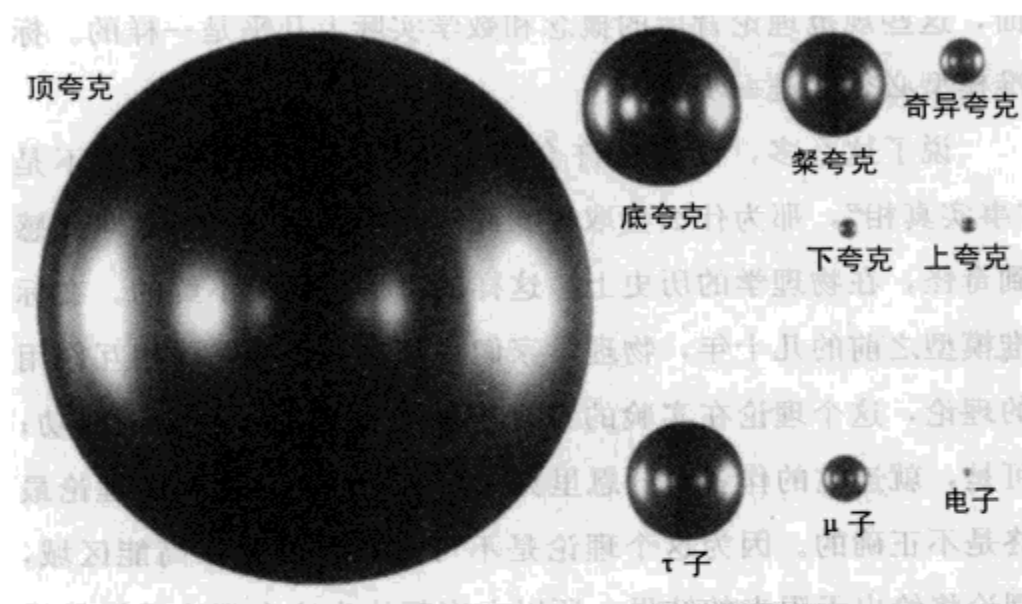


图 55 在这张图中，球的大小代表着基本粒子的静止质量（按这样的尺度，中微子小得根本看不见）。各个粒子的质量跨度很大，而且毫无规律可言。看起来这样的理论中只有顶夸克的质量显得自然些；解释为什么这些基本粒子的质量会如此之小是物理学家们面临的一项重大挑战

从美学的角度看也有很多的问题。标准模型的对称性用诸如  $SU(2)$  和  $SU(3)$  这样的典型李群描述。不同于被限制得很紧的例外李群，类似的  $SU(N)$  群有无数个。数学上， $N$  可以取任意值。大自然为什么要为  $N$  选一个特定的值呢？——为什么是 2 和 3，而不是其他，比如为什么不是  $SU(475)$  呢？而且更重要的是，标准模型并没有提供一个粒子相互作用的统



一理论。标准模型是包含了两部分理论的：描述强相互作用的  $SU(3)$  和描述电弱相互作用的  $SU(2) \times U(1)$ 。当然你可以将它们放在一起称为  $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ ，不过这和把两块对不上的七巧板捏在手中当成是合上了没什么区别。另一方面，这些规范理论背后的概念和数学实际上几乎是一样的。标准模型必须要进一步统一。

说了这么多，读者也许会感到奇怪，既然标准模型不是“事实真相”，那为什么会取得如此巨大的成功呢？不必对此感到奇怪，在物理学的历史上，这样的事情是屡见不鲜的。在标准模型之前的几十年，物理学家们一直有一个描述弱相互作用的理论，这个理论在实验的符合程度上也取得了巨大的成功；可是，就连它的作者——恩里克·费米——也认为这个理论最终是不正确的。因为这个理论是不可重正化的：在高能区域，理论将给出无限大的结果；所以大家都认为这个理论最终是错误的。错误的根源在于费米的理论将弱相互作用看成是一个点相互作用，而今天我们已经知道弱相互作用是通过交换  $W$  和  $Z$  规范玻色子来实现的。费米时代的对撞机能量都很低，远远低于  $W$  和  $Z$  规范玻色子的质量，在这样的对撞机上，弱相互作用可以有效地看成是点相互作用。我们可以说费米理论是弱相互作用的一个优秀的低能有效理论。或许标准模型也是如此：其实是高能量区域上具有普遍性的完整理论的一个低能有效理论。事实上，在我们向着终极理论前进的征途上，或许会在不同的能量区域中发展多个只在一定区域里起作用的有效理论。

对于很多物理学家来说，标准模型尽管已经取得了巨大的



成功，但是还有很多不足之处，太具有任意性，太丑陋并且太多的被迫性，不可能是我们一直追寻的终极理论。而且，它还有我们一直未提到一个致命的缺陷——理论中引力部分的缺失——使标准模型不可能是终极理论。

即使在标准模型普遍被接受以前，很多物理学家已经踏上了寻找超越标准模型的终极理论的征程。

## 第五章 | 大统一理论与超对称

海怪：哎哟，血狂，你的大肚子（guts）不错呀。

血狂：是吗，难道因为它比较挺？

史派克·密利根（Spike Milligan），  
《穿靴子的暴徒》<sup>①</sup>（*The Booted Gorilla*）

物理学的两大支柱有其坚实的根基。在其各自的领域中，广义相对论与标准模型分别经受住了所有实验的检验。这两大支柱之外的任何东西只能——不管内容变少或变多——是一种猜测。所有宣称将超越这两大支柱的理论都要打个问号。就像旧时代的地图作者常常在未知的区域写上：此处有龙（here be dragons）！

超越广义相对论已经被多次证明为一件极度困难的工作。但是物理学家们一直以来的确希望能有一种关于基本粒子及其

---

<sup>①</sup> 译者注：英国电视节目。作者在这里引用这段只是因为有 gut 字样，gut 是大统一理论的缩写。

相互作用的更加自然的理论。这个希望是有事实为依据的，因为那些发展标准模型的方法看起来可以循环使用并改善标准模型。首先进入人们思索范围的就是对扩充标准模型的方法的探寻。其中最值得了解的就是大统一理论和超对称。我们首先来看一下大统一理论。

## 大统一理论

114

一切未知的都是重要的。

塔西佗 (Tacitus), 《阿格里科拉》 (Agricola)

当我们开始探寻标准模型之外的物理世界时，第一步要做什么是很清楚的。我们已经知道了如何统一电磁相互作用和弱相互作用：首先给出一个具有足够大的规范对称性的理论来提供四个力的传递者；然后，通过希格斯机制将对称性部分破缺，于是四个力的传递者中的三个就将获得质量，另一个仍然无质量（即为光子）。对于统一理论，很明显，我们需要做的就按这个技巧继续扩张：选出某个足够大的“大统一”规范对称性以便于将胶子与电弱玻色子一起放进去——也就是说，要选出一个能将  $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$  作为其子群的大规范群——并用希格斯机制将这个大的规范群破缺。于是我们就得到了能将全部粒子物理包括进去的大统一理论。

在这样的图景下，宇宙看起来比我们现有理论描述的样子更加简洁也更加具有系统性。在极高能量区域（比如大爆炸之后连一秒钟都不到的时候宇宙的情形），我们现在观测到的三



种基本的粒子相互作用——电磁，弱，强——将会统一起来。随着宇宙逐渐冷却并发生相变，系统的对称性自发破缺，三种相互作用逐渐分离出来，宇宙变成了我们今天看到的样子。

能够将标准模型的  $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$  规范群作为其子群的群有很多，因此大统一理论的规范群也就有很多种可能性。其中最简单的群是  $SU(5)$ 。1974 年格拉肖（图 56）与霍华德·乔奇（Howard Georgi，图 57）就是采用这个群提出了第一个大统一理论。

物理学家们直接查群论书籍就可以找到  $SU(5)$  群的性质。他们从书中发现基于  $SU(5)$  的大统一场中必须要有 24 个规范玻色子，其中 12 个自然对应于我们所熟悉的 12 个传递力的规范玻色子（8 个胶子、3 个弱作用规范粒子以及 1 个光子）。另外的 12 个分量对应的则是全新的场。与这些新的场相关的量子——新的力的传递者——通常被称为 X 玻色子与 Y 玻色子。 $SU(5)$  理论中共有 3 个 X 玻色子，每一个都有  $-4/3$  的电荷及 1 个色荷（ $X_r, X_g, X_b$ ）；3 个 Y 玻色子，每一个都有  $-1/3$  的电荷及 1 个色荷（ $Y_r, Y_g, Y_b$ ）；每一个 X 玻色子与 Y 玻色子分别有其反粒子，所以总共有 12 个新的玻色子。

$SU(5)$  理论中，夸克和轻子通过一种特别的方式组合到一起。比如，d 夸克（如我们所知，有三种不同的色）与反电子  $\bar{e}$  和反电子中微子  $\bar{\nu}_e$  构成了一个扩充的代（ $d_r, d_g, d_b, \bar{e}, \bar{\nu}_e$ ）；这样我们就有了属于  $SU(5)$  大统一理论的一代费米子。

有趣的是，在诸如  $SU(5)$  这样的大统一理论中，粒子的扩充代的电荷之和必定为零。比如刚刚提到的这一代中，仅当 d 夸克电荷为  $-1/3$  时一代总的电荷会等于零。由于三种味，

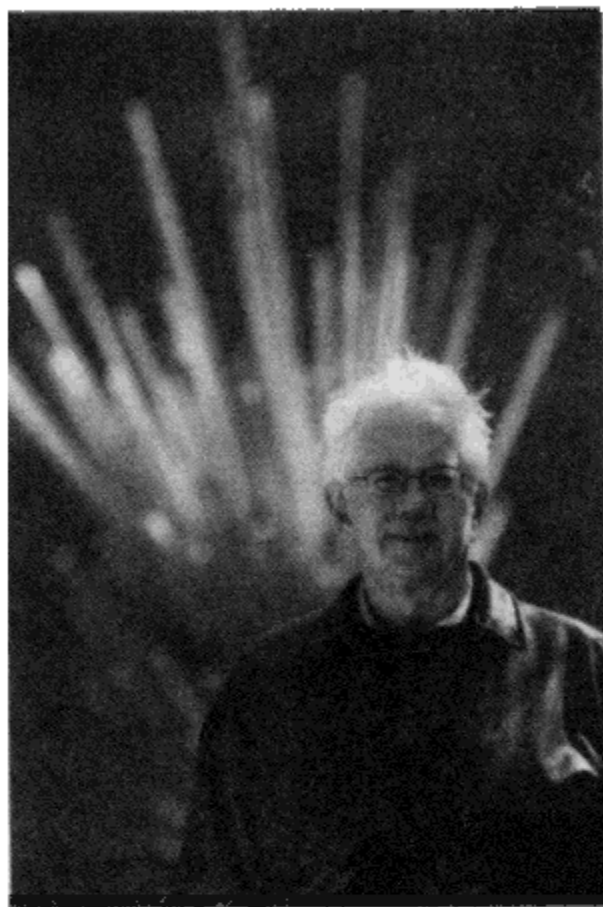


图 56 1979 年的诺贝尔物理学奖被授予了当时还是哈佛大学教授的谢尔顿·格拉肖与阿卜杜斯·萨拉姆及史蒂文·温伯格，以表彰他们建立了电磁相互作用与弱相互作用的统一理论。格拉肖也是大统一理论的先锋人物

所以所有的 d 夸克电荷之和为 -1，这样就与反电子及反电子中微子电荷之和抵消了（中微子的电荷当然是零了）。这种抵消仅当一代中有三种不同色的夸克存在时才会发生。在这个模型中，正是由于夸克有三种不同的色，所以夸克的电荷必须以  $1/3$  为单位！宏观物质常常是电中性的，这一点与我们自身的

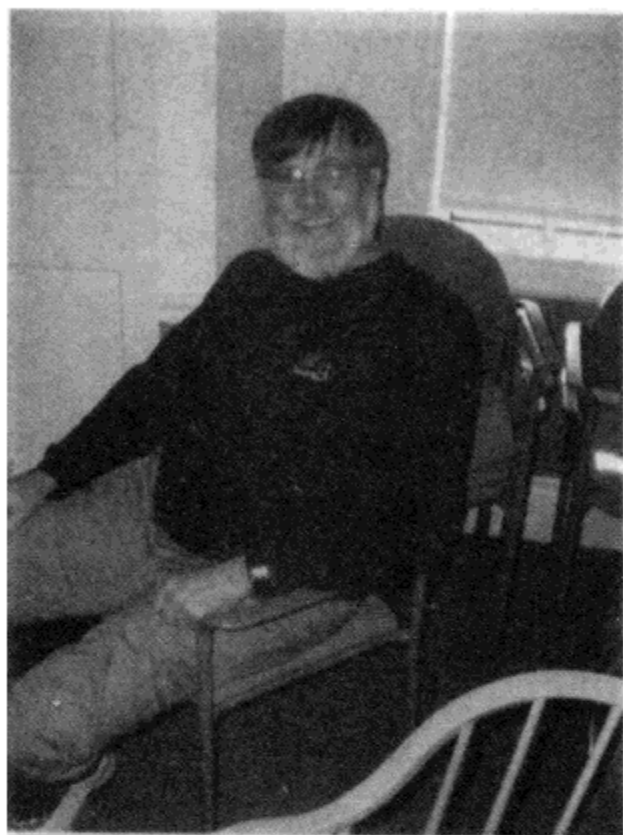


图 57 哈佛大学的霍华德·乔奇是发展大统一理论的关键人物之一，如今，他仍然活跃在这个领域，贡献着新的想法

存在息息相关；可是一直以来，我们只能说这是来自于原子核外电子电荷恰好与质子电荷等大且异号。但在标准模型的框架下，我们却不能解释为什么必定会有这种等大且异号，只能当成是命运的巧合。当我们转向大统一理论的时候，我们发现，这其实是大统一理论的必然结果，一个相当漂亮的结果。

SU(5) 理论也获得了其他方面的一些成功。比如，它可以预言三个耦合常数的比值；看起来似乎又能给弱混合角的值一个合理的解释，而弱混合角的值在标准模型中是一个自由参

数，需要实验输入。但是 SU(5) 大统一理论却能告诉我们这些基本参数为什么要取这些值。

所有这一切都使得 SU(5) 大统一理论看起来很有前途。可是，能否实验验证 SU(5) 大统一理论呢，就像物理学家们可以成功地检验标准模型那样？

在 SU(5) 这样的大统一理论中，我们可以在时空中的任意一点转动扩充代的结构而同时整个世界不发生改变，即是说允许同一代中的两个成员身份互换而不改变物理定律。但这一点有一个前提：规范玻色子必须知道相关的改变信息。X 玻色子与 Y 玻色子最引人注目的性质便是可以使相同的扩充代中的粒子有相互作用；特别是它们可以将一个夸克变成一个轻子。标准模型完全没有这样的性质，那么我们是否可以利用这一明显区别于标准模型的性质来检验大统一理论呢？X 玻色子与 Y 玻色子参与的此类过程有很多，图 58 所示的就是其中的一个典型过程。

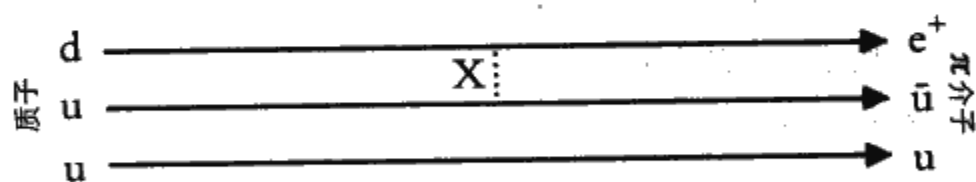


图 58 大统一理论允许质子衰变。这里所示的衰变过程是通过  $\pi$  介子与反电子而实现的；质子中的 d 夸克与 u 夸克交换一个 X 玻色子转变为一个反电子与一个反 u 夸克。存在的衰变途径有可能还有很多种

图 58 中，入射的是三个夸克，而出射的只是两个夸克及一个反电子。在这个过程中，通过交换一个 X 规范玻色子，d



117

夸克转变成了一个反电子。在  $SU(5)$  大统一理论中，参与图 58 的过程的费米子属于同一代，根据我们上面的讨论，可以有这样的相互作用过程发生。我们回过头再看一下  $SU(5)$  大统一理论中这种新的优美的对称性；标准模型中夸克与轻子的区别在这里消失。从深层次上讲，费米子——“物质的粒子”——不再被丑陋地分成夸克和轻子。

尽管图 58 这样的过程有其深层次的优美性，但却相当令人费解。因为这样的过程意味着质子可以衰变到一个反电子及一个中性  $\pi$  介子。而且，在大统一理论中，像这样的质子衰变过程还有很多。而在标准模型中，质子是不能衰变的；因为标准模型中有一条夸克数守恒的规律，重子层面上的这条规律就是重子数守恒。质子已经是最轻的重子了，所以质子是稳定的，不能衰变。我们周围所有的物质的稳定性，根本上来讲都是由于质子的稳定性。但是在统一理论中，质子是不稳定的，钻石不再恒久远。最终，所有的质子都会发生衰变，原子分解，我们只能剩下一钵电子中微子汤。

对质子衰变的探测将会是统一理论的一个清晰的实验检测。在我们进一步思考之前，我们必须要注意到一个事实：尽管统一理论允许质子衰变，但是质子仍可以看起来像稳定粒子一样。实际上，简单的讨论后立即就会发现质子的平均寿命至少应该大于  $10^{16}$  年（见下面补充性文字“人类与质子寿命”）。宇宙现在的寿命大约是  $10^{10}$  年——相比之下  $10^{16}$  年是相当长的时间了。如果统一理论允许质子衰变，为什么又会是这样的一种稀有现象呢？



## 人类与质子寿命

我们自身的存在就是对质子衰变半衰期的限制：人体中大约有  $10^{28}$  个质子，所以如果质子的寿命小于  $10^{16}$  年，则平均每秒人体就会有 30 000 个左右的质子衰变。你的身体健康就会受到辐射的危害！显然你现在正在安心地看着这本书，由此你可以断定质子的寿命至少要大于  $10^{16}$  年。

那么，质子的寿命到底有多大呢？

这个问题的答案就在于 X 玻色子与 Y 玻色子那极大的质量。我们可以来看看大统一发生时的能量大小，从而对 X 玻色子与 Y 玻色子的质量留有印象。根据重正化思想，相互作用的强度取决于我们测量的能量大小。耦合常数并不是真正的常数，标准模型中有三个耦合常数，其中两个属于电弱相互作用理论，电弱相互作用的一个耦合常数开始很小，随着能量的降低缓慢增大；另一个则起始时稍大，随着能量的降低缓慢减少。很明显，在某一点，两者必定会有相同的值。标准模型中的第三个耦合常数属于强相互作用理论；在电弱能量区域，强相互作用的耦合常数要大于其余两个耦合常数，不过它随着能量的增加降低得也比较快。当在某个能量点，三个耦合常数达到相同的数值，这时我们就说发生了大统一。1974 年，哈佛大学的三人组——乔奇、温伯格和海伦·奎因（图 59）——在 SU(5) 大统一理论框架下将三个耦合常数外推到极高能区。如图 60 所示，三个耦合常数看起来的确统一到一点。根据他们三人的研究工作，大统一的能量区域大约是  $10^{15}$  GeV——相距普朗克能量  $10^{19}$  GeV 不远；而我们知道，普朗



FIRST MOVER

第一推动

克能量正是引力需要用量子理论描述的地方。



图 59 海伦·奎因与霍华德·乔奇以及史蒂文·温伯格合作的论文是第一篇讨论强、弱以及电磁相互作用的不同耦合常数在大统一理论中如何合并成一个耦合常数的论文。在她与罗伯特·派西合作的论文中，她假定存在一种宇宙的近似对称性，并用这种对称性解释了强相互作用可以具有粒子与反粒子之间的对称性，而弱作用则不能够具有这种对称性

大统一理论所要求的能量实在是太大了——相当于一辆普通的家用汽车以每小时 50 千米的速度运动时所具有的动能。也许你认为这样的能量实在没什么了不得的，但是不要忘了，汽车中有大约  $10^{30}$  个粒子；而要达到大统一所需要的能量，我们要把这么大的能量全部交给一个亚原子粒子！这就是我们观测不到质子衰变的原因。不确定原理告诉我们，若要使两个夸克能够交换一个  $X$  粒子，则两个夸克之间的距离至少要小于  $10^{-31}$  米。这一尺度要比质子的尺寸小上足足  $10^{15}$  倍。在我们

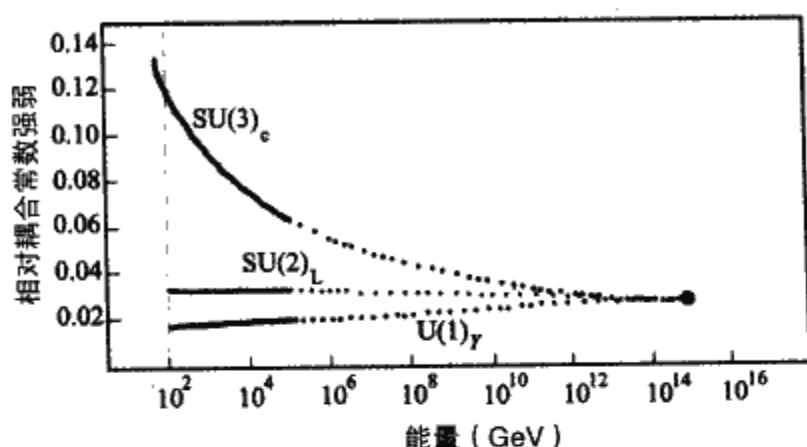


图 60 图中所示的是在  $SU(5)$  大统一理论的框架下，三个耦合常数随能量的变化。在 100 GeV 能量以下，电弱相互作用退耦为电磁相互作用和弱核力相互作用。但随着能量增加，电弱相互作用的两耦合常数逐渐接近——并且最终与色相互作用的耦合常数收敛于一点，这时的能量大小大约为  $10^{15}$  GeV，这个能量就是大统一能标

日常生活的世界中——甚至在高能粒子加速器上——夸克之间交换 X 玻色子或者 Y 玻色子的几率都小得可以忽略掉。如果你有足够的时间等待，那么量子力学告诉你的任何能够发生的事情都会发生。毕竟，中子中的夸克有时候就会靠得足够近以至于能够交换 W 玻色子，从而使得中子衰变为质子。这样的事情每几分钟就会发生一次。但是 W 玻色子的质量还不到 100 GeV。而夸克之间交换一个重达  $10^{15}$  GeV 的规范玻色子导致质子发生衰变的时间就要相当的长了。到底能有多长呢？根据基于  $SU(5)$  大统一理论的详细计算表明，质子的寿命至少超过  $10^{28}$  年。更加精细的计算或许会使这一数字提高一两个量级。

大统一的能量要达到  $10^{15}$  GeV 这一发现极富戏剧性。如



此高的能量尺度足以解释为什么没有观测到质子衰变；而且这一能量尺度神奇地接近于普朗克能标，这意味着与引力之间的联系并不远。而且，大统一能标并没有超过普朗克能标；要是超过的话，它就不会受人欢迎了。

毫不奇怪的是，物理学家们一定会为  $SU(5)$  大统一理论感到兴奋不已。除了我们讨论过的这几点，大统一理论在宇宙学上也有一些重要的应用（见补充性文字“大统一与物质的存在”及“大统一及暴涨”）。20 世纪 80 年代早期，大统一理论掀起了一阵理论研究上的热潮；不过相应的实验却相当缺乏。特别是，实验上一直没有观测到质子衰变，这对大统一理论的支持者仍是一大问题。

## 大统一与物质的存在

大爆炸产生等量的粒子与反粒子。粒子与反粒子相遇时会发生湮灭，只留下能量（能量通常以光子的形式存在）。如果在宇宙开端之时就有等量的粒子与反粒子存在，那么今天充满宇宙的就只能是光子了。但是我们放眼宇宙，满目物质，而不仅仅是光子，甚至我们本身都是物质；这无疑意味着某种机制使得宇宙诞生之时产生的粒子数目要多于反粒子的数目。通过计算宇宙背景中残留光子的数目，我们就可以推断出正反物质不对称性的大小了。根据计算结果，我们发现，宇宙中每一个物质粒子大约要对应  $10^{10}$  个光子。换句话说，在早期宇宙中，每有 10 000 000 000 个反物质粒子，则有 10 000 000 001 个正物质粒子。然后 100 亿个正反粒子成对湮灭，留下了一个正物质粒子和 100 亿个光子。

那么我们如何解释正反物质的不对称性呢？毕竟，物理定律看起来并未将两者区别对待。1967年，苏联物理学家安德烈·萨哈罗夫（Andrei Sakharov）证明要使一个正反物质数目相等的宇宙变成一个正物质主导的宇宙需要有三个条件。其中之一就是质子衰变。所以，大统一理论部分地解释了为什么今天的我们可以在宇宙中看到物质——还有，我们本身存在在这里！

假定质子的寿命正如之前计算的那样，我们如何才能观测到质子衰变呢？很明显的是，我们不可能等上  $10^{28}$  年，看一个质子到底衰变没有。但是我们却能等上一年看  $10^{28}$  个质子中是否有一个衰变。在一个地方我们聚集的质子越多，我们观测到质子衰变的概率也就越大。各边长均为 10 米的罐中储存的水大约含有  $10^{33}$  个质子；如果能将偶然的辐射屏蔽掉，并且在水罐周围布满探测器，我们就有可能观测到质子衰变的副产物。

世界上好几个观测组就是依据上述原理在过去的 20 年间做了大量的工作。那么他们的观测结果怎么样呢？很遗憾，没有观测到一例质子衰变。根据这些实验，我们可以给质子寿命一个下限，截至目前，这个下限是  $10^{32}$  年。

121  
122

## 质子衰变实验

IMB 实验——欧文大学、密歇根大学与布鲁克海文实验中心组成的一个合作组——始于 80 年代早期，终止于 1991 年，探测器建在俄亥俄州克利夫兰附近的莫顿盐矿地下 600 米处，光敏探测器环绕着一罐体积巨大的水（图 61）。实验装置



默默地等待着质子衰变时产生的一道微光。晚近的一些探测器，比如埋在日本神冈矿地下的超级神冈中微子探测实验器（Super-Kamiokande，这里的 nde 表示的是 neutrino detector experiment）等体形更加巨大，超级神冈中微子探测实验包括一个直径和高度大约都是 40 米的圆桶，其中装满了数千吨极端纯净的水，器壁由 13 000 个足以探测到单个光子的光电子倍增管覆盖（图 62）。相比于将粒子加速到光速并使之碰撞的加速器实验，这样的实验装置允许人们以一种安宁方式进行实验。

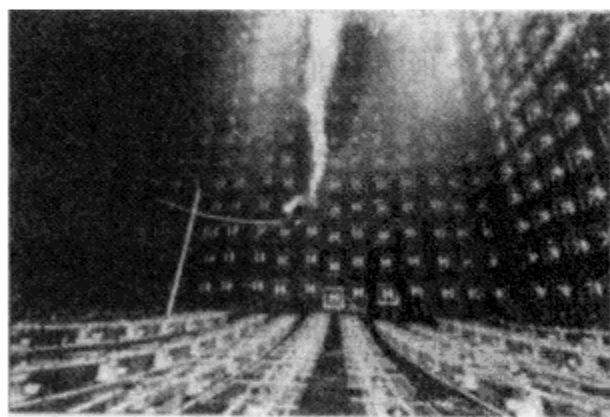


图 61 IMB 质子衰变探测器中没入水中的驱动器。尽管这台探测器并未探测到质子衰变，不过还是发现了一些有意义的结果

对质子衰变观测的失败可以算得上是为数不多的几个没有结果同有结果一样重要的物理实验中的一个。质子寿命要大于  $10^{32}$  年，这差不多将 SU(5) 或其扩充版的大统一理论都排除掉了。〔有些人将这个一无所获的结果看成是又一场科学悲剧——引用托马斯·赫胥黎（Thomas Huxley）的名句就是：

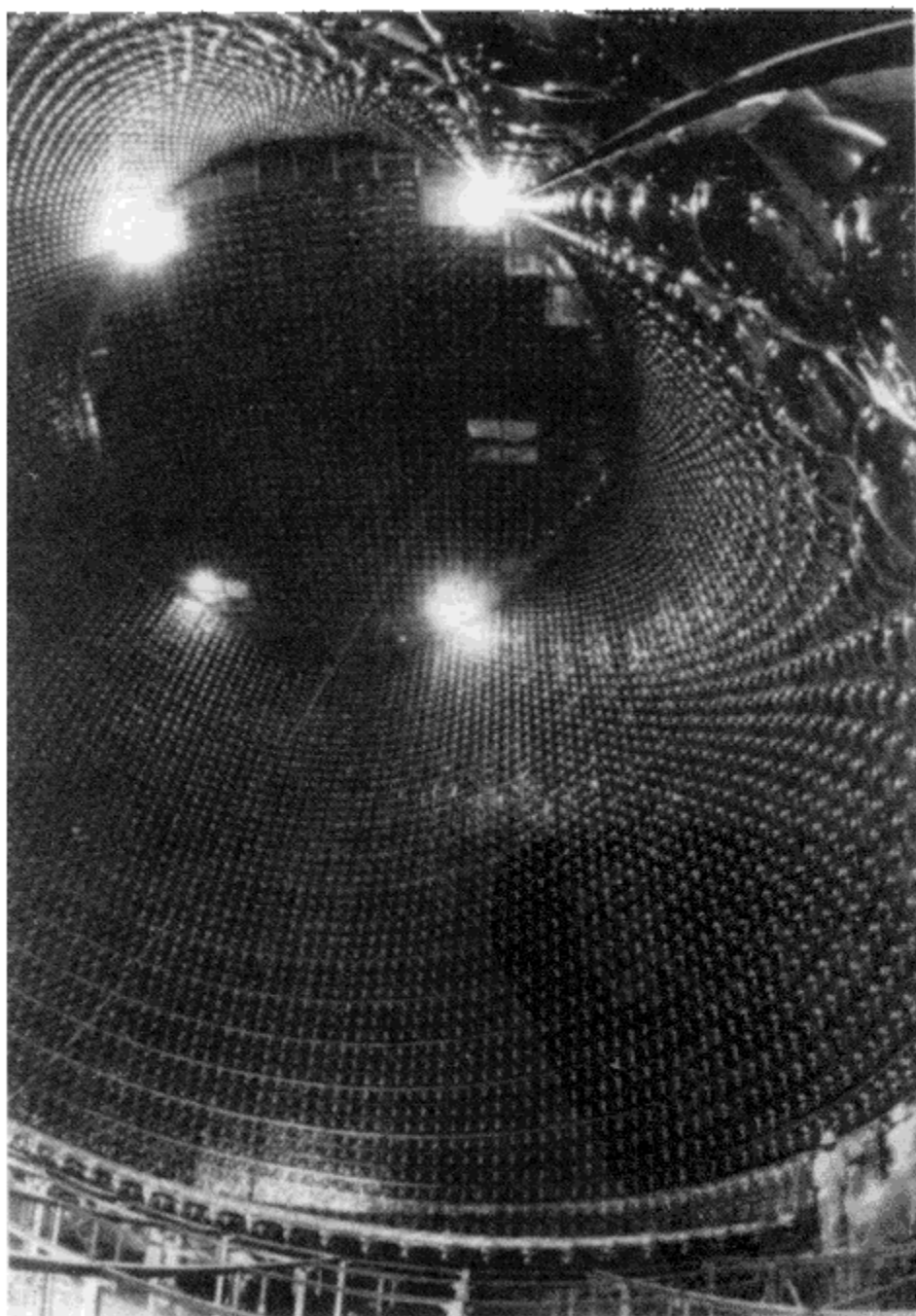


图 62 超级神冈中微子探测器的内部照片。2001 年的一场大火使之毁于一旦。近来已经重建并继续探寻质子衰变信号。超级神冈中微子探测器的另一个设计目的是探测太阳中微子（由太阳内部的核反应产生）及大气中微子（高能宇宙线进入地球大气层时产生）



美妙的理论被丑陋的事实绞杀。然而，另一件事却令人印象深刻。那就是，物理学家们在使用他们惯常的手段——粒子加速器——去达到大统一能量区域之前，就已经检验并排除了大统一方案。]

123

## 大统一及暴涨

大统一的思想直接导致了现代宇宙学另一最有希望的思想：暴涨。

大爆炸之后的最初  $10^{-15}$  秒，宇宙处于极高温度极大密度的状态。同时宇宙也具有高度的对称性，大统一理论中的所有的基元场展示着完整的对称性。随着宇宙的膨胀及冷却，大统一对称性破缺；宇宙发生相变。

相变之后，所有的物质都具有新的相位。但是相变要消耗一定的时间。比如，当纯水迅速冷却时，会在刚刚低于  $0^{\circ}\text{C}$  的时候保持一会液体状态。在大统一理论相变的时候也会有同样的情况：宇宙的某些区域可能正在发生延迟相变并在一定时间内处于“伪”真空态。这个伪真空态会储存大量的能量，当完全过渡到真空时，这些能量就会释放出来。

1981年，斯坦福大学的一位年轻的博士后研究员艾伦·古斯 (Alan Guth)，在某一区域短时间内处于这样伪真空态的条件下，使用广义相对论方程计算了宇宙膨胀时的情况。结果令人相当惊奇。假如大统一相变发生在大爆炸之后的  $10^{-35}$  秒，并同时假设在完全过渡到真空态之前处于这样的伪真空态  $10^{-35}$  秒，这一区域就会一下子扩大  $10^{25}$  倍。艾伦·古斯将这个超快膨胀的时期称为“暴涨”时期。[早在1979年，苏联物



理学家阿列克谢·斯塔罗宾斯基 (Alexei Starobinsky) 就曾讨论过类似的暴涨。但是直到古斯发表了他著名的论文之后, 暴涨的概念才深入人心。] 在暴涨的修改版本中, 它可以解决很多最初形式的大爆炸理论固有的问题。现在, 差不多所有的宇宙模型都会假设早期宇宙中曾经有一段暴涨时期。

SU(5) 理论只是大统一的一个初步尝试; 令人惊讶的并不是它的失败, 而是它竟能够解释如此之多的物理内容。尽管 SU(5) 大统一理论被实验排除了, 但我们却没必要放弃大统一思想。还有其他比 SU(5) 更大的对称性可以用来发展大统一理论。其中一个很有希望的候选者是 SO(10), 1974 年, 霍华德·乔奇与加州理工大学的哈罗德·弗里奇 (Harald Fritzsch) 及彼得·闵可夫斯基 (Peter Minkowski) 两人分别独立地研究了这种可能性。SU(5) 群是 SO(10) 群的一个子群。不过相比于 SU(5) 群, SO(10) 可以以一种更优美自然的方式实现大统一, SO(10) 群更加复杂, 在理论中共有 45 个规范场; 但它却能帮助我们更好地理解某些物理内容。比如, SO(10) 大统一理论可以解释为什么会有三种色荷存在。1976 年, 耶鲁大学的费泽·格西 (Feza Gursey)、皮埃尔·雷蒙德 (Pierre Ramond) 与皮埃尔·斯奇威 (Pierre Sikivie) 提出大统一理论的另一个候选者, 例外群 E(6)。基于 SO(10) 或者 E(6) 的大统一理论, 共同特点在于都具有较高的能标, 对质子衰变的预言全都大于  $10^{32}$  年, 所以都不能被实验排除掉。大统一理论还没有真正失败。

124



## 基于 $E(6)$ 的大统一理论

选择  $E(6)$  群作为大统一理论的规范群是一件很有趣的事。如我们早前的介绍，李群可以分为两大类。第一类是三种无限群： $SU(N)$ ， $SO(N)$  以及  $Sp(N)$ ，其中  $N$  可以取任意值。于是我们自然要问：大自然为什么会在其中挑选某一特别的值？为什么非得是  $SU(5)$ ？又或是  $SO(10)$ ？第二种类型是五个例外群  $G(2)$ ， $F(4)$ ， $E(6)$ ， $E(7)$  和  $E(8)$ 。其中，仅有  $E(6)$  可以给出一个手征理论（至少四维时如此），所以它是唯一有可能发展出大统一理论的例外群。 $E(6)$  群的确也很管用。但是它是一个很大的群——甚至  $SO(10)$  群都是其子群——在这样的理论中，除夸克和轻子外，额外还有 11 个新的费米子。于是我们只能假设，如果大自然真的选择了  $E(6)$ ，那么那些新的费米子一定太重以至于我们尚未观测到。

（译者注：在  $E(6)$  模型中，11 个新的费米子通常被称为“ $27$  表示”的费米子。）

## 大统一理论的问题

即使不考虑质子衰变问题， $SU(5)$  大统一理论还有其他的问题。其中的一些问题对于各种大统一理论具有普遍意义。

最初，很多物理学家为电弱能标及大统一能标之间出现的荒漠感到忧心忡忡。实验物理学家写成的历史表明，只要提高能量就会发现新的粒子：最早是原子核，然后质子，再后夸克，最后  $W$  玻色子与  $Z$  玻色子。按最小  $SU(5)$  模型的预言来看——除了期待的希格斯玻色子——在电弱能标 ( $10^2$  GeV) 和大统一能标 ( $10^{15}$  GeV) 之间，没有任何新的物理，新的粒

子。我们在看到任何有意义的现象之前，要将我们的加速器能量升高到现有水平的万亿倍之上。假如真的有这样的新物理荒漠，假如质子的衰变太过缓慢以至于不能观测到，这实际上就意味着根本不可能检验大统一理论的正确性。那就实在太令人灰心丧气了。（当然，仅仅因感到气馁并拒绝一个令人满意的理论，理由太过薄弱。而且，我们并不必放弃所有希望。还有另一个舞台**必定**可以由大统一理论演主角：那就是早期宇宙，其时能量极高。即使高能加速器穿不过能量的荒漠，即使质子衰变实验发现不了大统一理论的信号，我们仍然可以根据宇宙学的线索来了解大统一理论。由于这样的原因，在粒子物理学和宇宙学之间打通一条通道就显得极为重要了。）

另一个值得注意的对大统一理论的批评是，尽管大统一理论可以解释标准模型中的一些**参数**，但无论如何也不能解释全部参数。比如，大统一理论既不能告诉我们夸克和轻子为什么具有我们观测到的质量，也不能解释费米子为什么有三代。

更为严重的是，要是我们仔细地计算，就会发现标准模型的三个耦合常数随能量的演化并不能真正地交于一点（图63）。它们的确可以靠得很近，但是近并不等于相交。统一并没有发生。这一点差不多毁了整个大统一的概念。

也许最为严重的问题在于，大统一理论要忍受一个可怕的困扰：所谓的**规范等级问题**。虽然这个问题看起来很像一个技术问题，但是解决这个问题的诸多尝试却在过去的20年间推动了粒子物理学很多方面的发展。在本书的后面，我们还会再次碰到这个问题。这里，我们先来看一下它到底说的是什么。

标准模型中，费米子通过与标量（自旋为0）希格斯场

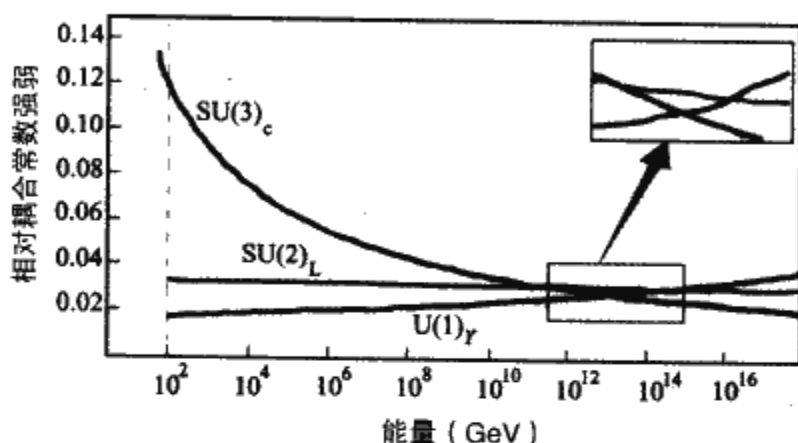


图 63 对 SU(5) 大统一理论的细致研究表明，三个耦合常数并未相交于一点。尽管靠得很近，但毕竟彼此错开。这意味着至少在简单的 SU(5) 大统一理论中并未发生大统一

126 (弥漫于整个宇宙)的相互作用获得质量。费米子的质量正比于费米子场与希格斯场的耦合常数。希格斯场通过自相互作用和与其他粒子的相互作用获得质量。但是由于希格斯场是一个标量场，因而会导致一些问题。标量场的相互作用与自旋非零的场的相互作用是截然不同的。由量子效应带来的标量场质量的修正与理论中最大的质量标度相同，这一点与有自旋的粒子截然不同。在大统一理论中，最大的质量标度就是大统一能标的量级，也就是  $10^{15}$  GeV。换句话说，根据量子力学，希格斯粒子可观测到的质量将高达  $10^{15}$  GeV。而粒子加速器上电弱理论的精确测量却表明希格斯粒子的质量**必定**与顶夸克的质量很接近。更准确地说，在本书写作的时候，希格斯粒子的质量既不会小于 114 GeV，也不会大于 249 GeV。如果希格斯粒子的质量真的很大——甚至不必大到  $10^{15}$  GeV——通常的标准模型公式就是错误的。

所以，一方面根据实验结果及标准模型框架下的理论计算，希格斯粒子实际上是很轻的（应该在 100 GeV 的量级上）；而另一方面，量子效应又告诉我们希格斯粒子必须极端的重（ $10^{15}$  GeV 的量级上）。这样构成的矛盾就是规范等级问题。最终我们只能说，从大统一理论中滋生出两个不同的能量标度：一个是电弱相互作用统一的能量标度；一个是大统一时候的能量标度。对于一个自旋为零的标量粒子来说，考虑了量子效应后，我们很难将这两个标度分开。

事实上，关于这个问题还是有一个解决办法的。在与其他的粒子相互作用之前，希格斯粒子有一个“裸”质量。我们可以精调这个裸质量使之正好消掉所有由相互作用带来的额外的大质量，只剩下一个几百个 GeV 的可观测质量。但是，为使结果与观测相符合，我们将不得不精调 24 位数字。用精细调节参数的办法来获得一个可以与实验相比较的结果这个办法相当丑陋；更诚恳的态度是举手承认你的理论行不通。等级问题的一个还能令人接受的解决办法是：假定在 TeV 的量级时，有未知的新世界——标准模型之外的新物理开始起作用。总之看起来理论的荒漠——之前的如 SU(5) 之类的大统一理论中特性——不应该出现。

对于所有合理的大统一理论，规范等级问题都是致命的杀手。而且大统一理论仍然未能将引力纳入其中。

但它们还没有完全失败。



## 超对称

超对称就是超级对称性。

盖茨 (Gates), 格里萨鲁 (Grisaru),

罗塞克 (Roček) 及西格尔 (Siegel),

《超空间》(Superspace)

在之前的几章中, 我们讨论过可以对时空起作用的变换: 平移, 将一个物体从一点移动到另一点; 转动, 将一个物体在空间中旋转; 赝转动 (boost), 改变物体速度。所有已知的物理定律在这些变换下都具有不变性: 我们将这种变换下物理定律的不变性称为时空对称性。上述的三种对称性之集称为庞伽莱对称性, 根据伟大的法国数学家亨利·庞伽莱 (Henri Poincaré) 命名。(如果对称性是局域的, 则会出现一种新的场, 那就是由广义相对论方程描述的引力场。从现在开始, 我们要把这一点记在心里。)

在一些一般性的假设之下, 物理学家们已经证明了庞伽莱对称性是同一粒子变换的最大时空对称性。如此一来, 我们看起来好像已经搞清楚了全部的与时空有关的对称性。而事实上, 庞伽莱对称性之外仍然有新的时空对称性。这种对称性将一个粒子变换成另一个不同的粒子——具有不同的自旋的粒子。这种对称性——超对称——将费米子变换成玻色子; 玻色子变换成费米子 (自旋的改变总是  $1/2$ ; 所以自旋为  $1/2$  的费米子就会变成自旋为 0 或者 1 的玻色子)。超对称变换并不影

响粒子的其他性质，所以，诸如质量、电荷等在超对称变换下都不受影响。截至目前为止，我们一直明确地将粒子分成“物质的”粒子（费米子）和“力的”粒子（玻色子）两大类，不过因为超对称的缘故，这种界限变得模糊了。

超对称也许是到目前为止我们所接触过的最美妙的对称性了。同样地，在一些一般性的假设下，物理学家们证明了超对称是庞伽莱对称性所可能有的最大扩充。所以，如果我们最终能够发现超对称，我们就会知道大自然最终还是选择了数学上和谐一致的时空对称性。尽管所有这些看起来似乎只有学术上的意义，但实际上超对称有非常广泛的应用领域。

理论物理学家们步履蹒跚地来到超对称面前，探索另一些与我们曾讨论过的大统一理论完全不相干的事情。事实上，早在 20 世纪 70 年代早期，东西方物理学家们曾三次各自提出超对称理论——彼此根本不知道对方的工作。苏联物理学家尤里·高尔芳（Yuri Golfand）及其学生伊夫金·利特曼（Evgeny Likhtman）于 1971 年讨论了超对称，但是他们的贡献却没人注意。1973 年，乌克兰的德米特里·沃可夫（Dimitrij Volkov）和弗拉季米尔·阿库洛夫（Vladimir Akulov）再次发现这一概念。1971 年美国的皮埃尔·雷蒙德、安德列·纳瓦尔（André Neveu）以及约翰·施瓦茨（John Schwarz）发现了超对称的一种形式（他们工作的动机将会在第七章中介绍）。之后，1974 年朱利叶斯·韦斯（Julius Wess，当时在卡尔斯鲁厄大学）与布鲁诺·祖米诺（Bruno Zumino，其时在 CERN 工作）首先将超对称用于量子场论 [“超对称”这个术语 1974 年由阿卜杜斯·萨拉姆与约翰·斯特拉思蒂（John

128



Strathdee) 敲定]。这些工作都没被立即应用于大统一理论。但这时引入超对称却有很重要的意义，因为，假如大自然真的具有超对称性，则大统一理论的很多麻烦立即就烟消云散了。

回忆一下，大统一理论的主要失败之处在于标准模型中的三个耦合常数并不能收敛于一点；大统一理论的另一个大麻烦就是所谓的规范等级问题。

重新计算耦合常数的演化，并将超对称的贡献考虑进去时，人们发现耦合常数的确相交于一点！如图 64 所示，在超对称性的大统一理论（SUSY GUT）中的确可以实现真正的大统一；另一方面，对希格斯质量进行计算时，由“正常”粒子引起的大质量贡献被超对称粒子的贡献精确消掉：在超对称中，等级问题根本不是一个问題！这一切都好的太令人难以置信了。所以让我们来好好地了解一下超对称，看看它究竟是什么样子并且能够导致些什么。

假定我们可以整体地将一个费米子改变半个自旋使之成为一个玻色子，如果大自然真的具有超对称性，则在我们的整体变换下大自然将不发生改变。变换下的不变性就是：对称性。

关于超对称，首先遭遇并且最重要的一个明显麻烦在于，没有一个已知基本粒子拥有能使得超对称变换发生的超对称伴。<sup>129</sup> 比如，不论是光子、弱相互作用玻色子还是胶子，都与电子的性质完全不同；我们根本找不到电子的超对称伴。既然如此，我们又怎么能够大谈超对称解决了所有的物理困难呢？

我们必须承认的一点是，这一问题很难回答。我们所能做的只是假设标准模型中的每个粒子都有其超对称伴，并且超对称伴的自旋与原来的粒子相差  $1/2$ 。我们还得进一步假设，



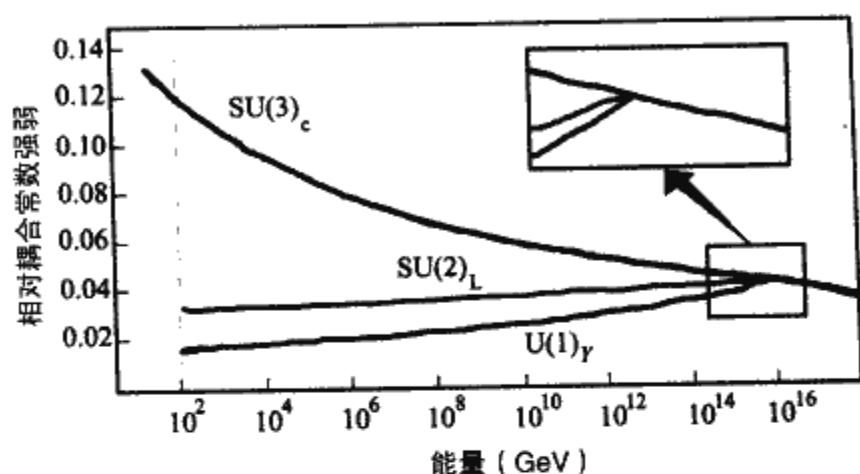


图 64 当超对称也被加以考虑时，标准模型耦合常数随能量的变化会有轻微的变化。这种变化会使耦合常数更加趋近于一点，也就是说，大统一还是能够发生的

因为某种原因，目前实验上看不到任何超对称伴，这样就逃避了看不到超对称伴的麻烦（如果你的人生态度比较积极的话，你就应该说我们已经观测到了一半的超对称粒子：即目前为止我们发现的全部基本粒子），稍后我们再来讨论这个问题。

命名超对称粒子依据这样的规则：在标准模型的费米子前面加上一个“s”就是它的超对称伴；规范玻色子后面加一个“ino”就是它的超对称伴。这样费米子的超对称伴称为标量费米子，比如电子（electron）的超对称伴就是标量电子（selectron）；夸克（quark）的超对称伴就是标量夸克（squark）；而规范玻色子常称为“一微子”，比如，光子（photon）的超对称伴就是光微子（photino）；胶子（gluon）的超对称伴就是胶微子（gluino）；等等。符号表示上，我们将标准模型粒子上面加上一个（ $\sim$ ）来表示相应的超对称伴；比如  $\tilde{\nu}$  表示的



就是标量中微子， $\tilde{W}$  表示的就是  $W$  微子，等等。显然，超对称的术语非常的丑陋，尽管如此，我们还是得常常使用到它们。表 1 列出了标准模型粒子及其对应的超对称粒子。

表 1 标准模型粒子及其超对称伴

| 粒 子         |     | 超对称伴                       |     |
|-------------|-----|----------------------------|-----|
| 粒子名称        | 自 旋 | 超对称粒子名称                    | 自 旋 |
| 电子 $e$      | 1/2 | 标量电子 $\tilde{e}$           | 0   |
| $\mu$ 子     | 1/2 | 标量 $\mu$ 子 $\tilde{\mu}$   | 0   |
| $\tau$ 子    | 1/2 | 标量 $\tau$ 子 $\tilde{\tau}$ | 0   |
| 中微子 $\nu$   | 1/2 | 标量中微子 $\tilde{\nu}$        | 0   |
| 夸克 $q$      | 1/2 | 标量夸克 $\tilde{q}$           | 0   |
| 光子 $\gamma$ | 1   | 光微子 $\tilde{\gamma}$       | 1/2 |
| $W^{\pm}$   | 1   | $W$ 微子 $\tilde{W}$         | 1/2 |
| $Z^0$       | 1   | $Z$ 微子 $\tilde{Z}$         | 1/2 |
| 胶子          | 1   | 胶微子 $\tilde{g}$            | 1/2 |
| 希格斯粒子       | 0   | 希格斯微子 $\tilde{h}$          | 1/2 |

130

超对称能够解决耦合常数的问题。当我们计算高能量处耦合常数的演化时，必须要将粒子的超对称伴的影响考虑进去；超对称粒子的出现改变了耦合常数的演化。而超对称之所以能够解决规范等级的问题则是因为：超对称粒子对希格斯粒子质量的贡献与标准模型粒子对希格斯粒子质量的贡献等大反号，所以两者相消（图 65）。由超对称性大统一理论描绘的世界图景具有非凡的对称性及高度简单性。想象一个有箭头的量子粒子，其箭头能够指向想象的空间的方向。箭头指向一边的时候，这个粒子是一个夸克；当它指向另一边时，它就是光子了；再次转动箭头，这个粒子就是电子了，诸如此类。而在这

箭头改变指向的时候，物理规律并不改变。想想看吧，这才是基本的东西应该有的样子。

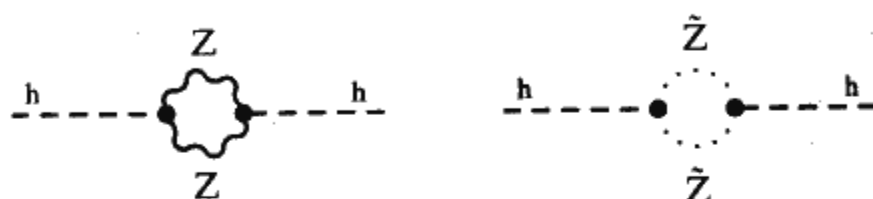


图 65 左图所示的是 Z 玻色子对希格斯粒子质量的贡献。这个贡献被右图的贡献精确相消；右图对希格斯粒子质量的贡献来自于 Z 粒子的超对称伴 Zino。这两个贡献大小相等符号相反。对所有的粒子都可以使用这种机制，从而解决了等级问题

这种种原因都使我们得出一个看法：超对称真是太美妙了。它不但允许三种力实现真正的大统一；还能够解决规范等级问题。还有别的什么妙处吗？是的，或许吧。比如，它能够解决宇宙中隐身了的物质的问题（见补充性文字“超对称与宇宙中隐身的物质”）。总之，关于超对称，值得一提的还有很多。

或许超对称最引人入胜的一点是以下要讨论的内容。假定你对一个粒子连续做超对称变换。比如，先将一个自旋  $1/2$  的费米子变成一个自旋为  $0$  的玻色子，然后再来次超对称变换将它变回自旋  $1/2$  的费米子。这个费米子就会移到空间中的另一个点（图 66）。换句话说，重复超对称变换会使我们得到一个空间变换——而空间变换属于庞伽莱变换。正如我们早前提到的那样，局域庞伽莱不变性正是引出广义相对论的对称性！就这样，我们发现了超对称与引力之间蛛丝马迹的联系。特别值得一提的是，表面来看，超对称与引力一点联系也没有。

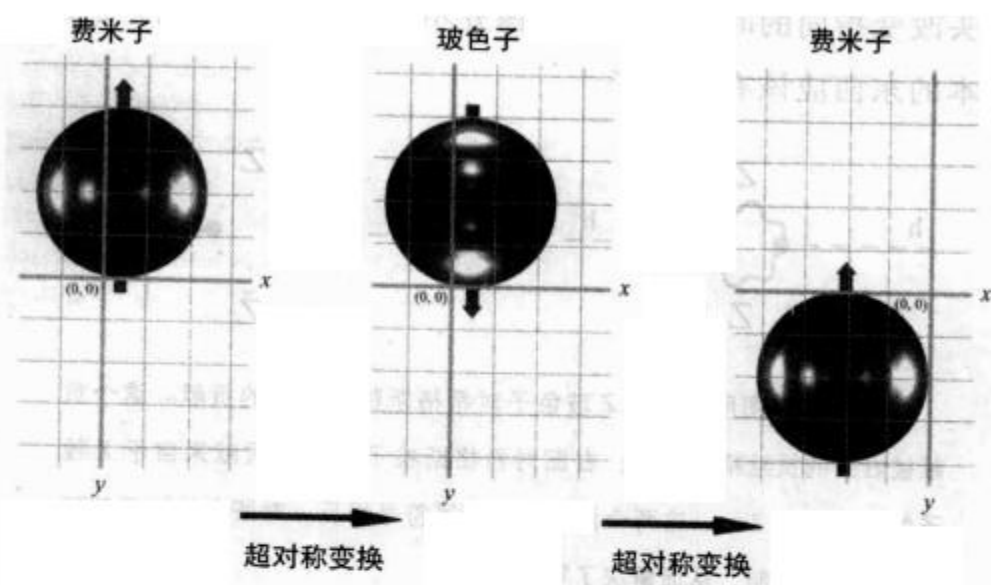


图 66 重复的使用超对称变换会产生空间平移！假设我们开始时有一个费米子；经过一次超对称变换我们得到一个玻色子，与原来的费米子具有相同的坐标但是自旋相差  $1/2$ ；而在第二次超对称变换后我们得到的费米子与初始费米子具有相同的自旋——但却在空间中的不同点上

131

## 超对称与宇宙中隐身的物质

很多年以来，天文学家就知道宇宙中大约 90% 的物质是“黑暗的”。它们不能被探测到；只有通过引力相互作用才能感受到这些物质的存在。这些“暗物质”通过引力将星系和星系团连在一起；但是并没有足够多的可见物质来保持这样结构的稳定性。各种证据表明这种物质必定是以“奇异”粒子的形式存在；也就是说，暗物质不可能由质子中子这些我们常见物质的粒子组成的。

暗物质的一个不错的候选者是 LSP——最轻的超对称粒子

(the lightest supersymmetric particle)。在大多数的超对称模型中都有一个守恒量—— $R$  宇称；所有的标准模型粒子的  $R$  宇称为 1；而所有的超对称伴粒子的  $R$  宇称为 -1。这意味着当我们将两个粒子彼此碰撞的时候，只能产生出一对超对称粒子，要不就只能产生标准模型粒子；在这样的碰撞过程中，绝对不会产生一个超对称粒子，因为这会破坏  $R$  宇称守恒。类似地，如果一个超对称粒子衰变的话，它只能衰变到奇数个超对称粒子加偶数（当然可以为零）个普通粒子；否则也会破坏  $R$  宇称守恒。如果  $R$  宇称真的守恒，那么最轻的超对称粒子将是绝对稳定的——因为它不可能再衰变到其他更轻的  $R$  宇称为 -1 的粒子了。所以大爆炸之后产生的 LSP 将会一直留到今天，它们就是今日宇宙中大部分质量的起源。然而我们却不能观测到它们，因为 LSP 不能与我们可以看到的光子相互作用。那么哪一个超对称粒子是所谓的最轻超对称粒子呢？很遗憾，我们一无所知。因为我们根本不能确切地知道任何一个超对称粒子的质量。实际上，根据量子力学的基本规则，不同的粒子之间可以彼此混合；在大多数超对称模型中，最轻超对称粒子不是一个纯粹的超对称粒子，而是自旋 1/2 的中性微子 (neutralino)，它是  $Z$  微子 (Zino)、 $W$  微子 (Wino) 和希格斯微子 (Higgsino) 的量子混合。从很多方面来看，最轻的中性微子 (符号  $\tilde{\chi}_1^0$ ) 都像是一个重的中微子。

天文学的观测为我们提供了超对称的证据。某些时候，中性微子会与其他粒子碰撞，从而产生中性微子的“激发态”。我们知道最轻的中性微子  $\tilde{\chi}_1^0$  是稳定的；而次轻的中性微子  $\tilde{\chi}_2^0$  可以衰变到最轻的中性微子  $\tilde{\chi}_1^0$ ，并伴随产生正负电子对。所



以，在宇宙背景中找到高能正电子的话，将意味着有可能是超对称的信号。

132

讨论过前面的几个问题之后，我们还未将超对称的全部魅力尽数展现。在超对称被引入到物理学之后的 30 年间，由于其独特的吸引力，超对称导致了总共数以万计的各种题目的研究论文——上千人数年工作的结果。但我们也决不能忘记难堪的实验事实——没有任何实验证据表明基本物理必须包括超对称。我们既没有发现夸克的超对称伴，也没有发现电子的超对称伴。很多物理学家因为实验上一无所获而感到灰心。爱因斯坦发表他的广义相对论之后的第四个年头，实验就已经证实了理论的正确性；即使难捉摸的中微子也仅仅在泡利提出它之后的第 27 年就被实验发现。不过希格斯粒子迟迟未能发现倒几乎没引起什么不舒服的，尽管 1964 年就在理论上提出了它存在的可能性。物理学家愿意投入如此之多的时间精力去探索一个很有可能并不存在的现象，这本身就是超对称究竟有多么高深莫测、多么美妙的一种象征。不考虑其理论上的优美之处，很多物理学家更愿意用直接的可靠实验证据来讨论。既然我们在天文学上已经有了可能的实验方法，那么我们还有没有别的寻找超对称的办法呢？

133

如果我们要去寻找超对称，那么我们首先要接受的事实就是我们身边的世界并不具有这样的对称性。超对称即使存在的话，也必定由于某种原因被强烈地破缺了。当然，我们以前就遇到过对称性的自发破缺。电弱对称性并不是我们身边世界的对称性；高能时的宇宙的确具有这样的对称性，但是在我们的日

常生活的能量范围内，这种对称性破缺掉了，所以我们看到的只是独立的电磁力和弱作用力。或许超对称也是如此，当最初的宇宙处于最大的对称性的状态，大自然的规律在超对称变换和规范变换下具有不变性。在精确的超对称及规范对称性下，所有的物质和规范粒子都是无质量的。随着宇宙逐渐冷却，超对称性破缺，超对称粒子获得质量；而由于规范对称性的保护，普通的粒子仍然是无质量的。或许超对称的破缺引发规范对称性的破缺，于是普通的粒子与超对称粒子获得不同的质量；超对称粒子重些，而普通粒子轻些。今天我们之所以能够看到普通粒子，就是因为它们相对容易产生出来；而之所以不能看到超对称粒子则是因为它们比较重，不易被产生出来。

关键的问题在于：超对称粒子的质量究竟是多少？假如最轻的超对称粒子的质量是  $10^{15}$  GeV 的话，显然，我们在加速器上是看不到它们了。但是若普通粒子的超对称伴只有 200 GeV（典型的电弱能标）的话，那么很快，在 CERN 的大型强子对撞机上，我们就会看到超对称粒子的身影。在 LHC 的能量上，一对胶子碰撞就足以产生一对胶微子；一个胶子与一个夸克碰撞就有很大的机会产生一个标量夸克与一个胶微子。标量夸克与胶微子立即就会衰变成清晰可辨的轻粒子态。要是运气好的话，在 2007 年 LHC 开动之前，我们就可以在 Tevatron 上看到超对称粒子。

那么到底哪种才是正确的呢？超对称粒子的质量究竟是在我们根本看不到的大统一能标呢？还是在我们即将在 LHC 上就能看到的电弱能标呢？

目前，还没有人知道超对称（假如存在的话）究竟是怎么



134

破缺的。由于不知道超对称如何才能自发破缺，所以很多模型的权宜之计就是将超对称破缺项“手放”到理论中。这一点显然不能令人满意。不过，假如我们相信超对称就是等级问题的解决办法的话，超对称粒子就不可能比标准模型的特征粒子质量大很多。如果超对称是精确成立的话，那么普通粒子和超对称粒子对希格斯质量的贡献就会精确相消；但如果是在破缺的超对称中，两者的贡献就不能精确相消——不过剩余的就只是超对称粒子质量的量级了。我们已经知道希格斯粒子的质量必定是 100 GeV 量级，所以标量夸克、标量轻子还有其他超对称粒子的质量不可能太大。如果超对称真的存在，几年之后我们就会在 LHC 上看到它。

不过如果我们在 LHC 上没有看到超对称，那么我们就得好好地考虑下我们的理论了。现在，我们先假设我们能够发现超对称，然后看看这个假设会有什么结论。

## 局域超对称

超空间根本就是轮子之后最伟大的发明。

盖茨，格里萨鲁，罗塞克及西格尔 (Gates, Kangaroo, Roachcock, and Gall), 《超空间》(Superspace)

到目前为止我们都还是在讨论整体对称性变换的超对称。当我们在一点做超对称变换时，则所有的点也都要做同样的超对称变换。听起来整体变换好像比局域变换更重要些似的。不过我们在前边曾经强调过，局域变换的限制性更强因此威力也



更加巨大。如果我们研究局域超对称性，那就意味着我们可以在不同的点进行不同的超对称变换而保持物理规律不发生变化。相当强的要求，不是吗？

具有整体变换不变性的物理定律，并不一定同时要满足局域变换不变性。将一个整体变换转换成局域变换的时候必须要引入一个抵消场——规范场——于是就产生了力。比如，我们知道电磁场方程具有整体相位变换不变性的特点；我们也可以使电磁场在局域相位变换下具有不变性，只不过我们要引入抵消规范场。当我们获得在不同的时空点为狄拉克场选取不同相位的自由的时候，我们为理论引入了光子。在整体对称性下我们可以有电荷的概念，但是只有在局域对称性的概念下，我们才有光子和光。这个结果内涵深刻。或许你会想，要求理论具有局域超对称变换不变性也将导致一个内涵同样深刻的结果；也许你会要求在不同的时空点有自由选择粒子或超对称粒子的自由，以便能够得到更加有意义的物理。你的想法一点都没错：当你要求理论具有局域超对称性的时候，的确会得到很多内涵深刻的结果。

就像以前一样，要使理论具有局域对称性，你就必须要引入抵消场。事实上，若要求超对称性是局域的，则将会引入两种规范场。一种规范场传递与超对称变换有关的信息；数学上，这样的规范场必须是自旋  $3/2$  的场。另一种规范场传递的是两种超对称变换的交汇——如我们早前所见，等价于时空变换——信息，这种规范场应该是自旋为 2 的无质量场。

自旋为 2 的无质量场的引入强烈地刺激着一批理论物理学家的神经。如果你相信量子尺度上的引力也是通过交换某个粒

135



子来实现的，那么你就可以推测出那个粒子——引力子——的某些性质。引力子必须是无质量的，原因在于引力和电磁力一样是长程力。因为引力是吸引力，所以引力子的自旋必须是0，2，4，…这样的偶数，具有奇数自旋的粒子（比如电磁场的光子）产生的是排斥力。如果引力子是自旋为0的粒子，我们就不能观测到引力透镜的效应——光在引力场中发生弯曲。而这一现象是天文学家们已经实实在在观测到的现象，所以引力子的自旋不可能是0。自旋大于2的情况则由理论自洽性的技术原因被排除掉了。这样我们就只剩一种可能了：引力子是自旋为2的无质量粒子。于是我们发现，引力子其实就是局域超对称理论的规范粒子！[另一个自旋为3/2的规范粒子是引力子的超对称伴，称为引力微子（gravitino）。]

我们反过来再看一遍。假如一开始我们就假设在量子场论中，引力场是通过交换自旋为2的无质量粒子实现的，则我们就将推出广义相对论方程。所以只要要求理论具有局域超对称性，就将自动地得到引力相互作用。这是超对称所引发的另一个壮美的结果！

令超对称性是一个局域对称性时，人们会自动得到广义相对论，所以局域超对称理论被称为超引力。第一个超引力理论由当时还在纽约州立大学石溪分校的丹尼尔·弗里曼（Daniel Freedman）和彼得·纽文惠泽（Peter Nieuwenhuizen）以及巴黎的高等师范学校的瑟吉奥·费拉拉（Sergio Ferrara）于1976年首先提出（图67）。这一理论立即成为广义相对论方面60年来最重大的成就。他们的理论是最简单形式的超引力理论，只包含一个引力子和一个引力微子，再什么也没有了。显



图 67 2001 年，超引力迎来了它的第 25 个生日。在纽约大学石溪分校举行的第二十五届超引力大会上，超引力理论最初的三位创始人——彼得·范·纽文惠泽，瑟吉奥·费拉拉以及丹尼尔·弗里曼与将要继续探索该理论分支的年轻物理学家们齐聚一堂

然，这不可能是一个真实反映宇宙的理论；我们至少知道还有自旋  $1/2$  的基本夸克和基本轻子，以及自旋为 1 和 0 的玻色子。不过没关系，因为超对称可以将临近的费米子玻色子联系起来，所以很容易就可以将其他的粒子包含到原始的超引力理论中。事实上，共有八种可能的扩充版超引力理论，彼此之间用  $N$  来区分，其中  $N$  可以取值为  $1 \sim 8$ 。 $N$  为理论中明显超对称变换的次数。

136

超对称一个很吸引人的性质在于它的粒子完全是根据对称性的限制分类的。之前我们已经提到，在原始的  $N=1$  的超引力中，只有 1 个引力子和 1 个引力微子；稍微复杂点的  $N=2$



的超引力中，有 1 个引力子，2 个引力微子以及 1 个自旋为 1 的粒子； $N=3$  的超引力中，有 1 个引力子，3 个引力微子，1 个自旋为 1 的粒子以及 1 个自旋  $1/2$  的粒子。具有最大的对称性的是  $N=8$  的超引力理论。这个理论有一个独特的规范对称性，用  $SO(8)$  群描述。根据群论的数学知识，我们知道  $N=8$  的扩充超引力理论中有 1 个引力子，8 个引力微子，28 个自旋为 1 的粒子，56 个自旋  $1/2$  的粒子以及 70 个自旋为 0 的粒子。（之所以没有  $N$  大于 8 的超引力理论是因为，这样的理论将不可避免地引入自旋大于 2 的粒子。而我们已经知道这样的理论是不自洽的。）

$N=8$  的超引力理论完成后立即引起了人们的注意，其原因并不难理解。这个理论乍看之下，有一个真实的大统一理论候选者所需要的足够多的基本场。在这个理论中，有 28 个规范玻色子——看起来比大统一理论需要的力的传递者还多些。而且，这个理论不仅能统一电弱相互作用和强相互作用，还能将引力相互作用也包括进来。统一完全是以一种自然的优美的方式进行的，正如人们所期待的那样，理论具有最大限度的时空对称性。除了这些，超引力还有另外一个好处：可以消除量子引力中的无限大。

我们曾经在量子理论中遇到过无限大。比如，在早前原型的量子场论中的 QED 就包含无限大。还记得吗？QED 过程中最低阶的贡献是有限并可观测的，而本应该对原来的结果有一个小的微扰贡献的下一阶结果中却包含无限大。微扰论的第一阶是所谓的“圈图”（图 42 中的电子发射再吸收一个光子的过程就是圈图过程），正是这些圈中产生了无限大的结果。类似

的，第二阶的贡献有两个圈图，同样也是无限大；第三阶的贡献有三个圈图，还是无限大，以此类推。在 QED、QCD 以及电弱相互作用理论中，这些圈图都可以重正化——将这些无限大放到质量、电荷以及耦合常数等的重新定义中。

广义相对论的量子形式中所包含的无限大却不能这么轻易地就解决掉。量子电动力学与量子引力有一个潜在的不同之处：量子电动力学中作用于一个粒子上的力是正比于其电荷的；而在量子引力中，作用于一个粒子上的力是正比于其质量的。而根据爱因斯坦的理论，质量等价于能量，所以引力的大小会随着能量的增加而增加。在一个量子过程中，引力随着所交换的虚引力子的能量增加而增加。所有的麻烦都是由量子引力这个高能行为所带来的。当我们计算一个圈图对几率的贡献时，必须要将所有可能的虚粒子能量都加起来。在 QED 中，因为力不依赖于能量，所以没有什么问题；但是在量子引力中，这个力会随着能量的增加而增加。我们可以将 QED 中的无限大想成是  $1+1+1\cdots$  这样的形式，这种样子的无限大我们还能够处理；但是，在量子化的广义相对论中，无限大的形式是  $1+2+3\cdots$ ，这样的无限大实在是太糟糕了。无限大中有一个无限大变量，这样的理论是不可重正的。

超引力理论能够驯服这个无限大。在量子引力的原始理论中，引力相互作用是通过交换引力子传递的。而在超引力理论中，引力相互作用不仅可以通过交换引力子来传递，交换引力微子也可以对引力有贡献（引力微子自己是不能传递力的。引力微子是费米子，要满足不相容原理，不能够组合起来产生一个宏观的力。不过引力微子确实能被交换，但因为它们是费米



子，必须成对交换)。低能时，交换一对引力微子的贡献可以忽略掉，引力完全是通过交换引力子来实现的，这时我们得到通常的广义相对论预言；但在高能的时候，由交换引力微子而引起的贡献就不可忽略了，当我们计算包含引力微子的圈图的贡献时，我们会发现无限大消掉了！事实上，立即就可以证明，所有的超引力理论在一圈时都是有限的。不久，人们发现两圈的贡献也是有限的。

于是，一幅迷人的物理图像出现了。或许高能（比加速器的能量高很多，但不必有普朗克能量那么大）时的大自然具有最大数目的超对称： $N=8$  的超对称。很可能大爆炸后的一瞬间大自然就是这样的。在  $N=8$  的超引力中，我们得到了一个引力、粒子以及各种不同的力大统一的理论。随着宇宙膨胀冷却，超引力破缺，剩下一个超对称大统一理论作为低能有效理论。我们可以将超对称当成是解决等级问题（还有所有那些能由超对称解释的问题）的一个办法。之后，超对称也会破缺，于是得到了我们在低能世界熟知的  $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$  理论。20 世纪 80 年代早期，很多物理学家都希望超引力就是统一理论。

不幸的是，上面描绘的图景并没什么用。大自然终究没有选择这样一个美妙的理论——至少上面讨论的最简单的形式没被大自然接受。 $N=8$  的超引力理论有一些基本的缺陷。

首先，标准模型的规范群  $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$  并不是  $N=8$  的超引力理论的规范群  $O(8)$  的子群，事实上  $O(8)$  的最大子群只能是  $SU(3) \times U(1) \times U(1)$ ；显然这个子群并不足以包括标准模型。当然，对于这种限制也有一些解决的办法。

比如，这个理论可以有一个“隐藏的” $SU(8)$  对称性，这样就能将标准模型的  $SU(2)$  群纳入其中了。不过这意味着光子和胶子是真正基本的粒子，而  $W$  玻色子和  $Z$  玻色子就是复合粒子了。若是就是这样，理论原来所具有的美学意义就没有了。

理论中更糟糕的问题在于没有适当的轻子。尽管  $N=8$  的超引力理论包含有 56 个费米子，但是在各种对称性破缺操作后，剩下的无色轻子已不足以构成三代。

139

另一个问题在于扩充的超引力理论不是一个手征性理论，因而很难解释为什么我们所看到的标准模型是一个手征理论。

不过相比于以上这几点， $N=8$  的超引力理论最致命的一个缺陷在于它不是一个可重正化的理论。虽然量子引力所带来的无限大可以因为超引力而得到改善，不过，却没有处理干净。当我们计算引力子对的散射到第七圈的时候，无限大又回来了。

在本章中，我们越过了漫长的征途，带着大统一、超对称以及超引力等概念，我们急切地向着微观世界与宏观世界的统一迈进。虽然有所进展，离目标还差得很远。看起来我们还需要一些更加新颖的观点才能将引力纳入到微观世界中。有趣的是，或许我们需要的最重要的观点已经陪伴广义相对论很多年了。现在我们就去看看这些“疯狂的”物理思想中的一个——更高的维度，如果我们在四维的时候不能实现大统一，那么我们不如到更高的维度去看看。

## 第六章 | 更高的维度

我仍然期待这些论文集能以某种我不清楚的方式对人类智力有所贡献，激发那些拒绝局限于有限维度的叛逆者。

E·A·艾伯特 (E. A. Abbott), 《平地》(Flatland)

爱因斯坦花费了他一生的大部分时间寻找一个统一的理论——一个能将引力与其他的力统一起来的理论。至少这是爱因斯坦认为自己在做的事情。因为爱因斯坦并不了解在原子核尺度上还有哪些力存在，所以他所能做的只是试着去统一引力与电磁力。可是我们知道大自然除了有电磁力，还有弱相互作用力和强相互作用力；并且它们都与电磁力一样是基本力。在爱因斯坦去世后的60年中，基本粒子物理如雨后春笋一般茁壮成长起来。事后来看，爱因斯坦当时的努力全都白费了，引力与电磁力的统一理论至多只能是整个故事的一章。

不过即使这样，要是能有引力与电磁场的统一理论也相当不错；统一引力与其他任何一种力的思维方式或许会帮助我们



解决我们在前几章中所遇到的问题。值得注意的是，爱因斯坦刚刚发表他的广义相对论不久，一种确实可以将引力与电磁场组合到一起的想法就出现了。那是一个疯狂的想法，当时如此，今天仍是如此。但是如果我们能够接受这个想法，我们也许就会发现开启宇宙神秘之门的钥匙。

## 卡鲁扎-克莱因理论

梦想着新的维度。

罗伯特·格拉夫 (Robert Graves), 《城堡》(The Castle)

早在1919年，当时还在柯尼斯堡大学的初级学者西奥多·卡鲁扎 (Theodor Kaluza, 图68) 就曾在给爱因斯坦的一封信中提出了一个相当大胆的建议。卡鲁扎写下了一个五维时空中的广义相对论方程，五维时空指的是四维空间加一维时间。这样的五维理论意味着时空中的每个点都需要有五个坐标才能表示：四个空间坐标（而不是我们的三个空间坐标）来表示空间位置，一个通常的时间坐标来表示当前时刻。虽然这样的做法看起来有些奇怪，但爱因斯坦的广义相对论并没有规定不能有这样的额外维度。爱因斯坦在建立他的



图68 T·E·E·卡鲁扎



广义相对论时自然地假定有三维空间和一维时间，这一点或许是爱因斯坦最应该担心的。将爱因斯坦的理论放到额外维度中或许会更具数学意义。事实上，可以自由地选取维度的数目或许应该被看成是爱因斯坦广义相对论的一个弱点：要是理论本身就能告诉我们宇宙应该有多少维度不是更好吗？不管是不是弱点，总之卡鲁扎可以自由地研究五维中的广义相对论方程，并且卡鲁扎的确发现了一些很奇怪的结果。电磁场的麦克斯韦方程与爱因斯坦的广义相对论的四维形式都可以自然地由完整的五维理论得到。

对此，爱因斯坦感到相当吃惊，“乍看之下，我相当欣赏您的想法，”爱因斯坦回信说。在稍后的另一封信中爱因斯坦写到：“您的理论形式上的统一性令人非常吃惊。”的确，这是一个令人非常困惑的结果。引力与电磁力具有明显不同的性质，但是卡鲁扎证明这两种力可以由一个单独的理论自然地给出。爱因斯坦思考卡鲁扎的建议时，心脏一定会因为激动而剧烈跳动。不过爱因斯坦却将卡鲁扎的理论推迟发表长达两年之久，爱因斯坦的疑虑不难理解：在物理中这额外的维度到底意味着什么？

143

从我们的日常生活经验中，我们可以很肯定地说：这是一个三维空间的世界。我们可以向上下、前后、左右移动。从数学上来说，我们仅仅需要三个坐标就可以表示空间中的任何一点，就像我们仅仅需要一个坐标就可以表示一条线上的任意一点，需要两个坐标就可以表示一个平面上的任意一点。所有这些都意味着我们的世界是三维的。甚至我们可以更加实际地看待这个问题，当我们在一个密封的空间中打开一罐气体时，由

于气体分子间的随机碰撞，气体分子会向四面八方扩散——很明显的一点是它们只能在三个维度内扩散；我们从未见过气体分子消失到其他的维度中。那么我们要第四个维度干什么呢？

在 20 世纪早期，更高的维度的概念是“虚无缥缈”的。数学家们发现他们可以用他们的常用工具来研究更高维度的性质，并且得到了很多有意义的结果。从某种意义上讲，当爱因斯坦和闵可夫斯基发展四维时空的概念时，更高维度的数学概念就已经被引入到物理学中了。所以，更合理的情况也许是：当物理学家们看到爱因斯坦和闵可夫斯基理论的成功时，他们就应该开始着手发展更高维度的理论了。事实上，早在卡鲁扎提出他的理论 5 年之前，芬兰物理学家古纳·诺斯托姆（Gunnar Nordström）就已经开始尝试通过电磁场的麦克斯韦理论的五维形式来统一引力和电磁场了。（爱因斯坦发表了他的广义相对论之后，诺斯托姆便放弃了他的方法。他的统一努力失败的原因在于不能解释一个关键的观测结论：引力场中的光将发生弯曲。）20 世纪早期，更高维度是物理学中的一个热点话题。第五维的引入只是一个数学技巧呢，还是有其深刻的物理含义呢？对卡鲁扎理论的成功诠释于 1926 年由奥斯卡·克莱因（Oskar Klein，图 69）提出。

克莱因发现了卡鲁扎五维理论的一个主要缺陷：卡鲁扎的理论本质上只是更高维度的爱因斯坦广义相对论，所以它只是一个经典理论。1926 年的时候，人们已经发现世界遵从量子力学法则。所以克莱因决定探讨卡鲁扎理论与量子力学的相容性问题。如果卡鲁扎理论不能被量子力学接纳，则必定要被放弃。



克莱因首先写下五维时空中的量子力学基本方程，通过求解该方程，克莱因证明了可以将其解看作是普通的四维时空中的电磁波和引力波。这样五维理论就通过了克莱因提出的检验：五维理论与量子力学具有相容性。并且，量子力学的引入为第五维提供了一种物理诠释。



图 69 奥斯卡·克莱因

克莱因论证道：假定第五维是一种物理上真实存在的维度，则它必定是蜷曲的。换句话说，假定在时空中的每一点都存在一个圆环，对大多数人（当然我也是大多数人中的一员）来说，就算并非不可能，要发现这样的圆环也是极为困难的。用一个简单的类比来说清我们正在讨论的问题。假如我们的世界并非三维的，而只是数学上的一条线——仅有一个维度，这就意味着只要有一个数，即一个坐标，就可以决定线上的任意一个点。我们假定在线上的每一个点都有一个圆环，于是我们就需要有两个坐标才能确定某个圆环上的某点位置，那么我们就是生活在两维世界了。如果这些东西听起来很复杂，那就想想橡胶软管是什么样子的。如果一条线上的所有点都有一个圆环的话，那么这些圆环就组成了一个圆柱形的东西，比如橡胶软管，这还比较好理解些。不过你能想象一下在宇宙的

每一点也都有一个这样的圆环吗？理论上跟橡胶软管是一样的。克莱因认为我们的宇宙就是这样的五维结构：用四个坐标（按爱因斯坦的分类：三个空间坐标一个时间坐标）表示我们平常所说的宇宙中的点，还有一个坐标表示每个点上的环的坐标，见图 70（橡胶软管的类比不是很好，因为管本身存在于一个四维世界中。克莱因所描述的五维时空并不需要存在于任何更高的维度中）。

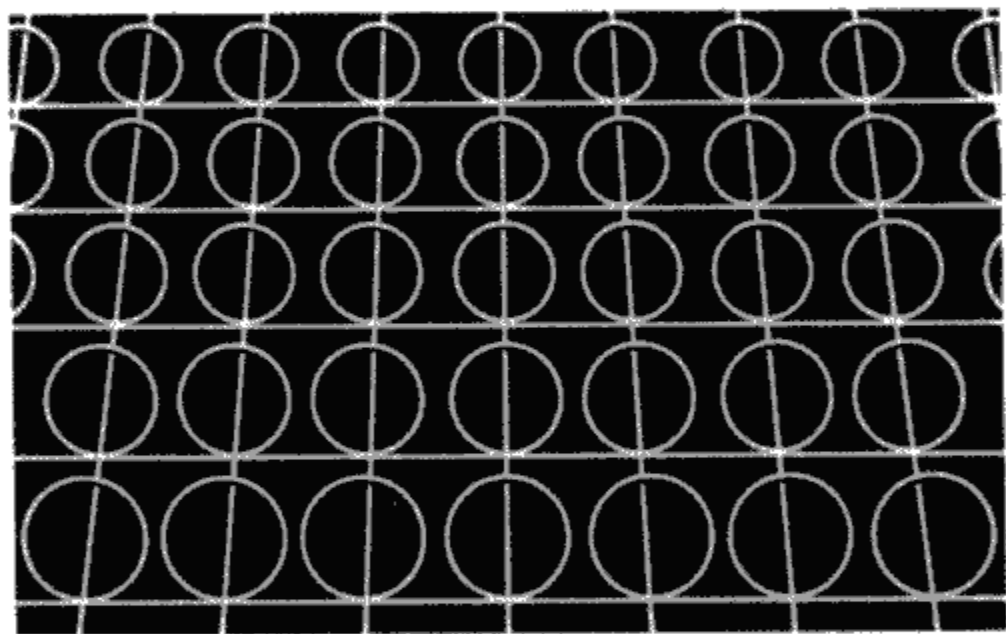


图 70 奥斯卡·克莱因的看法是宇宙中的每一点都有一个小小的圆环。时空是五维的，而不是我们所熟知的四维（三维空间加上一维时间）。我们之所以不能看到额外维是因为它实在太小了，以至于不能被探测到；额外维甚至比质子还小，甚至亚核子粒子都感受不到额外维的存在

从远处看，橡胶管好像一条线一样。如果我们观察在这条管上爬行的蚂蚁，我们或许会认为这只蚂蚁只能在一维世界中



爬行：要么向前爬，要么向后爬。只有当我们靠近管时，我们才能看出其实还有另外一个环形的维度。只有靠得非常近的时候，我们才能看清小蚂蚁不是仅仅只能沿着圆环前后爬行，还可以围绕圆环爬行一圈再回到起始点。克莱因认为或许我们的宇宙也是这个样子。我们之所以不能看到这个蜷曲的第五维，完全是因为这个维度的半径实在太小了。如果这个圆环的半径比一个空气分子的尺寸还小的话，那空气分子就不能扩散到这个第五维中——因为相比之下，空气分子太大了。根据不确定原理，我们只能用高能粒子来探索小尺度。如果一个粒子的能量很低，那它的波长就会很大——所以它就不会感受到第五维。而在高能加速器上，我们可以探索  $10^{-18}$  米这样的尺度。所以，假如第五维的尺度小于  $10^{-18}$  米，那么我们即使用最复杂的实验也不能看到这样的维度。

由于克莱因改进了卡鲁扎的想法，所以这种统一方式一般被称为卡鲁扎-克莱因理论。原始的卡鲁扎-克莱因理论对于宇宙的认识非常美妙。潜在的五维时空只拥有一种力——引力。一切都非常简单。但是像我们一样在大尺度的四维时空中的观测者看来，世界有所不同。我们可以看到引力——那是四维时空的弯曲；我们也可以看到电磁场——那是潜在引力场在环形的第五维上的起伏。[我们还应该看到一个标量场，与之相伴的自旋为零的粒子称为伸缩子 (dilaton)。在卡鲁扎-克莱因理论中，出现伸缩子就像电磁场中出现光子一样自然。]

有时超级市场中会有一些货品贴着“买一赠一”的标签。假如你愿意接受紧致的并且环形的第五维这样的思想，那你将免费得到电磁场——电磁场的麦克斯韦理论是引力的爱因斯坦

几何理论的一个必然结果。（你还会得到一件特别赠品——伸缩子，不过你或许不知道它能派上什么用场。）我们马上就会看到，稍稍改进一下，我们就可以将其他的规范作用力——弱相互作用力、电磁相互作用力——一股脑地放到一个统一的图景下。

不同的人有不同的承受底限。对于有些人来说，付出引入一个不可见的第五维这样的高昂代价，换来的只是一个物理问题的解决，似乎很不值。不过对我来说，额外维的思想至少不比量子力学更加古怪。当然，这两种思想的区别之处在于所获得的实验支持不一样。我们所做过的每个实验都告诉我们宇宙本质上是量子规律在起作用；不管我们喜欢与否，我们都得接受量子力学那天生不可思议的特点。相反，没有任何实验能让我们相信更高维度的真实性。不过，在五维中，广义相对论方程仍然成立；克莱因的思想——第五维是紧致的——解释了我们为什么没有看到它。另外还有一个宇宙学的论据也暗示着额外维存在的可能性（见补充性文字“额外维的宇宙学论据”）。所以我们不能立即就拒绝更高维度的概念。

尽管这些都只是捕风捉影，但却使我们有理由相信额外维存在的可能性。如果我们相信额外维是可能存在的，就会发现得到了很大的自由：我们可以自由地选择额外维的维数，不是仅有一个额外维才可以，也可以有两个额外维或是任意多个。我们可以用数学来考察哪个才是自治的理论，哪个理论有内在的意义。如果所有这些理论都不自治，我们就可以拒绝整个额外维思想；也许有些理论的确是有意義的并且值得进一步进行研究。当然，最终必须要将理论与真实世界联系起来才行：任



何理论在低能的时候都必须要约化成标准模型的形式，解释我们为什么没有看到额外维，并且预言在未来的实验上我们有可能看到些什么现象。短期内，严肃地考察卡鲁扎-克莱因思想也并非没有理由，我们完全可以看看到底能用它做些什么。

147

## 额外维的宇宙学论据

宇宙处于膨胀之中，在宇宙的极早期，我们现在所能看到的大尺度平坦维度必定是小而蜷曲的。假定宇宙起源时有五个 $10^{-33}$ 米的普朗克尺度的紧致维度，我们没有任何理由认为五个维度非得按相同的速率扩张。完全可以将宇宙的膨胀想象成一个维度保持不变而其余的纬度逐渐扩张的过程。于是扩张的维度最后到了 $10^{26}$ 米（相当于今天的宇宙半径），只剩下一个维度孤独地保持着 $10^{-33}$ 米（图71）。相同的讨论也可以用于其他数目的额外维理论；或许宇宙开始于很多个小的维度——其中只有一部分扩张成我们今天看到的这个样子。

现在，卡鲁扎-克莱因的想法已经很老旧了；这一思想早于规范场理论、大统一、超对称还有其他我们讨论过的题目。但是，过了初期的热烈追捧之后，物理学家们已经冷落这个题目很多年了。如果这真是一个好的统一思想，为什么物理学家们不更加深入地钻研它呢？难道是卡鲁扎-克莱因理论有什么致命缺陷？

我们已经见过了对卡鲁扎-克莱因理论的第一个反对原因，即：为什么我们看不到第五个维度？答案是：它是紧致的，所以我们看不到它。于是第二个问题立即就会出现：额外维的尺





图 71 假定时空起始时只有两个  $10^{-33}$  米的空间维度（就是两个普朗克尺度）。同时假定大爆炸之后，距今几十亿年之前，这两个维度开始扩张——并持续扩张——而其他的维度保持很小的尺度。我们可以将额外维看成是图（a）的样子；而对于时空中只具有很低能量的观测者来说，时空看起来像图（b）中的样子一般，额外维相当于已经不可见了

度到底有多大？克莱因自己曾最先估计过额外维的尺寸——但是结果却激发了额外维的一个实际问题。

148

克莱因的讨论大致如下。根据量子力学，与粒子相关的波可以在环形的第五维中运动。但为了能够在实验上观测到，波必须为驻波；就好像吉他上的琴弦，因为两端都是固定的，所以琴弦振动产生的音波一定是驻波。所以粒子波要么振幅有确定的大小，要么波长应该等于环的圆周长（意味着波绕环一周有一次全振动），周长一半（两次全振动），周长三分之一（三次全振动），如此等等。粒子的能量，也相当于质量，反比于波长。所以，卡鲁扎-克莱因理论中，质量最小的粒子对应的波长应该是无限长，也就是振幅为常数的波。这些粒子的质量为零。卡鲁扎-克莱因理论中第一个有质量的粒子对应的波长



等于环的圆周长；正好在环中有一次全振动。

我们按下面的方法估计这些粒子的质量。因为该理论可以统一引力与电磁场，所以粒子就要既有质量又有电荷；实际上，电荷是反比于环的周长的。如果假定这个荷就等于电子的荷，则我们就可以计算出质量。计算的结果是质子质量的  $10^{16}$  倍。显然，这么大的质量不能从加速器实验中观测到。（卡鲁扎-克莱因理论中，粒子实际上构成一个无限高的粒子塔，最下面的是一次全振动对应的粒子，然后是两次全振动对应的粒子，三次全振动对应的粒子……每个整数次全振动的波都对应着一个粒子。找到这个粒子塔就是对理论强有力的支持；可是，要是我们连最轻的粒子都找不到，还讲什么找到这个粒子塔呢？）如果第一个有质量的粒子真的是有质子质量的  $10^{16}$  倍重，我们倒是可以估计出环的周长：大约是  $10^{-32}$  米，非常接近于普朗克尺度。这就是我们遇到的问题：这样的小尺度实际上是不能通过实验探索的。毫不奇怪，20 世纪 30 年代的物理学家们根本没办法考虑直接检验这一想法。相反，量子力学方面的惊人进展提供了宽广的试验场。物理学家们自然被吸引到量子领域，从而被迫放弃额外维的概念。

后来人们发现，伴随理论而来的标量粒子伸缩子，也是接纳卡鲁扎-克莱因理论的一块绊脚石。今天的物理学家倒是很乐意假定各种实验上还没看到的粒子存在——或许这是因为泡利和他的中微子取得巨大的成功所带来的结果——但是在克莱因生活的岁月里，人们对这样的事一向是大皱眉头。我们不如像很多有勇气的物理学家一样来认真地考虑一下伸缩子的问题。问题的关键是伸缩子是无质量的，即使有也很轻。推测起

来，大爆炸之后立即会产生许多这样的粒子，所以我们应该能够观测到它们的。对于那些现在只在理论上存在的粒子，什么 X 玻色子、超对称粒子呀，还有其他假定存在的各种东西，我们都可以简单地逃脱责难：之所以没观测到完全是因为它们太重，超出当前实验能力了；但是要解释为什么实验上没看到诸如伸缩子这样的小质量粒子，那就要费点劲了。虽然这不是理论的致命伤，但的确有点难以自圆其说。

而且伸缩子还有另一个大麻烦。每个点上的额外维大小取决于该点上的伸缩子场。在克莱因最初的公式中，他将伸缩子取为常数；也就是说，任何一点的第五维环半径都是一样的。不过有什么理由一开始就确定它们的大小呢？更自然的做法应该是时空中的每一点有不同大小的额外维。不过这样的话，伸缩子场就不能取成常数了；而是要么无限大要么为零。这也就意味着额外维在某些点就要被“修剪”成零，在另外一些点就要“放大”成无限大。想象你站在一个灌满水的橡胶软管上，橡胶管的“额外维”在你脚下的那一点就被你踩瘪了，不过橡胶管的“额外维”在其他地方就会鼓出一个大水球。很明显，我们从未看到过宇宙的什么地方的小小的克莱因额外维鼓成了一个气球或者变得很大。不过伸缩子场是否能变成零我们就不得而知了——但是理论学家们已经证明：要是伸缩子场曾经是零我们是能够注意到的。

因为上面的这些，再加上另外一些其他的原因，物理学家们失去了对卡鲁扎-克莱因理论的兴趣。但额外维的想法的确使人着迷；引力和电磁场的统一也那么地不可思议。在 20 世纪 70 年代晚期，人们逐渐感到：或许卡鲁扎和克莱因——还



有之前的诺斯托姆——的思想有点超越时代了。

### 然而更多的维度……

一个人的头脑一旦被新思想所占据，

就再也找不回过往的心思了。

奥利弗·温德尔·霍姆茨 (Oliver Wendell Holmes)

150

在原始的卡鲁扎-克莱因理论中，电磁场的  $U(1)$  局域规范不变性的出现是由于额外维的环形几何。相对论具有绕环旋转不变性——而用以描述绕环旋转不变性的群正是  $U(1)$  群。假定每一点不止有一个小圆环，而是有两个，也就是说时空是六维的，这样对称群就是  $U(1) \times U(1)$ 。生活在我们这个四维世界的观测者就应该看到两种不同的光子——分别在不同的两个环形维度中具有转动不变性。推广上述思想，时空中每一点不止有一个小圆环，而是在每一个点有一个具有很多维度的紧致空间。按行话说，在每一个点有一个流形。虽然看起来有点荒谬——当然在这短短的一页中也没法准确地描述清楚——不过，换个角度来看，比起假定在每一个时空点有一个紧致的一维空间，难道假定在每一个时空点有一个紧致的七维空间就真的更加荒谬吗？如果我们愿意接受宇宙有很多更高的维度这样的想法，那么我们会发现回报颇丰：流形某些特别的对称性会以我们一直居住的这个大的四维世界的规范对称性的身份出现！所以如果某个流形具有  $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$  对称性，则我们就将看到  $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$  规范对称性——也就

是现实世界的标准模型。于是就以优美的几何方式统一了引力和其余所有的力。我们就实现了爱因斯坦的统一大梦。

1981年，普林斯顿高等研究所的数学物理学家爱德华·威滕（Edward Witten，图72）发表了他的经典论文（众多经典中的一篇）。在  $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$  对称性的条件下，威滕证明了紧致流形所能具有的最少维度是七维。 $U(1)$  是环的对称群，而环是一维的；而二维球面就是具有  $SU(2)$  对称性的最低维度的空间了；具有  $SU(3)$  对称性的最低维度的空间的维度是四维。于是紧致空间所能具有的最少维度是  $1+2+4=7$ 。所以，要是我们的“真实”世界实际上是十一维的，其中我们熟悉的四维世界的每一点有一个七维的紧致空间，那么我们就有希望借助于卡鲁扎-克莱因的灵感发现统一引力和其他的力的真正理论。正如威滕在其论文中指出的那样，时空维度的最小数值是11，这件事意义非同寻常。因为可能写出的自洽的超引力理论维度的最大数值也是11（如果写出大于十一维的超引力理论，你就会发现，在将其约化到我们熟知的四维理论时会出现自旋大于2的粒子。而在前几章中已经提到，如果有这样的高自旋粒子存在，则不能给出包含引力的自洽的量子场论）。所以，你若希望你的高维度理论既包含标准模型同时又是一个超引力理论，则其只能是一个十一维理论。

早在威滕发表其论文之前，巴黎高等师范学校的尤金·克莱默（Eugène Cremmer，图73）、伯纳德·朱利亚（Bernard Julia）及乔·舍尔克（Joël Scherk）就已经建立了一个美妙的理论：十一维中的  $N=1$  的超引力。其理论独一无二，是所有的超引力理论中具有最多的对称性并且最优美的一个；并可以



FIRST MOVER

第一推动



图 72 人们普遍认为爱德华·威滕是当代最聪明的理论物理学家。近 20 年来他一直引领着高能物理学的研究。他的工作高度数学化——或许这样的工作太过数学以至于不能使他获得诺贝尔物理学奖。不过威滕已经被授予了数学领域的菲尔兹奖，该奖被认为是数学领域的诺贝尔奖

自动地约化成大的四维空间和七维的紧致空间，于是就解释了我们为什么存在于四维空间。并且约化后的四维空间包含  $N=8$  的超引力，在前面我们已经看到。 $N=8$  的超引力是实现四维中力的统一的一个极佳的候选者。（事实上，克莱默、朱利亚以及舍尔克只能在通过写出十一维中  $N=1$  的超引力然后约化到四维中的办法得出  $N=8$  的超引力；更高维度的理论实际

上更加简单且便于处理。)



图 73 尤金·克莱默，与其同事伯纳德·朱利亚与乔·舍尔克一起发展了十一维的  $N=1$  超引力理论。这一理论曾是“终极理论”的候选者

看起来大自然不会拒绝一个使用这种结构的机会。事实上，很长一段时间内，相当多的物理学家相信十一维中  $N=1$  的超引力就是他们所一直追寻的统一理论。

不过，一切并不如愿。

在前面的章节中，我们曾经讨论过  $N=8$  的超引力的一些问题。比如，尽管比其他一些引力的量子理论要好一些，不过  $N=8$  的超引力仍然是不可重正化的：考虑到大于七圈的费曼图时，无限大不能消除。（或许这意味着理论可以在低能区起作用，但却要在高能区失效；这样的话，它就只是一个低能有效理论，而不是真正的基本理论。）在其 1981 年的论文中，威滕指出了另外一个问题。因为空间的额外维关于左手自旋和右

152



手自旋的粒子具有对称性，所以卡鲁扎-克莱因型的理论不能区分左手自旋和右手自旋的粒子。但是我们实际观测到的粒子作用却是具有与自旋有关的不对称性：电弱相互作用将左手自旋和右手自旋的粒子区别对待。这就是手征性疑难。虽然看起来仅像一个技术问题，但却极难攻克。威滕在他的论文中燃起了一些攻克这一难题的希望，我们将在后面加以介绍。

在十一维  $N=1$  的超引力理论中，七个维度按照卡鲁扎-克莱因的精神紧致化以便其具有不可观测性。我们正在急切地向着真正的统一理论挺进，几乎就找到了像处理其他的力一样处理引力的理论框架，但是我们仍未成功。我们实在无法将一个这样好的理论全部丢弃。特别是额外维的概念，更应该保留下来。显然，我们还需要一些更新鲜的思想指引我们继续前进。



只要把纪律的琴弦拆去，

听吧！多少刺耳的噪音就会发出来。

威廉·莎士比亚 (William Shakespeare)，

《特洛伊罗斯与克雷西达》(*Troilus and Cressida*)

我们先来整理一下我们所学过的知识。根据量子场论和局域规范对称性的精妙原理，我们建立了标准模型的理论框架，并成功地解释了迄今为止的全部粒子物理实验。但标准模型是不完备的：它包含两段看似需要统一起来的理论；而且，标准模型完全没有考虑引力。第一个问题由大统一理论解决，大统一理论扩充了标准模型的规范群。但大统一理论本身也有一些问题，不过好在我们可以引入另一种对称性削弱这些问题，这一对称性就是超对称。将超对称取为局域对称性的时候，引力自动显现出来。于是我们顺理成章地得到了超引力理论。最后，我们引入了更高空间维度的思想——物理学家们为了将引力与电磁场纳入到一个统一的框架下而提出的一种古老思想，



将额外维的思想与超引力组合到一起，我们得到了一个几乎就成功地将所有的基本粒子与其相互作用纳入到统一理论框架下的基本理论——十一维的超引力。

154

不幸的是，十一维的超引力也有其自身的问题。在它取得一定成功的同时，人们也发现它只能是一种在一定的能量区域才起作用的低能有效理论，就和标准模型只在与我们生活的世界能量比较接近的区域才有效一样。十一维的超引力不可能是我们所一直追寻的终极理论。从根本上讲，所有的问题似乎都可以归结到一点，那就是量子场论实际上处理的是类点客体。用这一套方法讨论夸克与轻子很有效；不过在讨论引力子——传递引力的粒子——时就会出问题。物理学家们计算包含引力子的费曼图时会遭遇无限大，理论中出现无限大是一个明确的错误标志。物理学家们并不能像在量子电动力学（QED）和量子色动力学（QCD）中做的那样处理掉量子引力中出现的无限大。因此与引力有关的量子场论不能给出有意义的结果。

后来，物理学家们认识到还有另外一种方法可以在量子力学的框架下将引力与其他的力统一起来。这种方法是目前为止唯一看似仍然有效的方法，以至于在这种方法发现后，很多物理学家立即就欣然地接受了这种方法所带来的高昂代价。其代价在于量子场论中不再存在我们所熟悉的类点客体——夸克、轻子、规范玻色子等——所有的这些点粒子都由一维的弦代替。而且，我们必须假设弦存在于高维的时空中，超对称也是先决条件之一。如果我们拒绝接受弦论、更高的维度、超对称这些深奥的理论的话，那么我们似乎就没有足够的“空间”将引力及其他的相互作用纳入到统一的量子理论中。或许未来的

某一天，物理学家们可以凭借远胜于 20 世纪科学家们的非凡想象力将引力与其他的相互作用统一起来，而不用弦论或更高的维度等，但在过去的 20 年间，弦论和额外维却不失为就是最好的统一工具。

[值得一提的是，人们至少还有另外一种将广义相对论和量子力学统一到一起的研究方法，那就是圈量子引力（有关细节见补充性文字“圈量子引力”）。这种方法已经取得了一些成就。不过相比于弦论，圈量子引力似乎野心不足，因为连标准模型都不是它的研究范围。而弦论是唯一试图统一所有的基本物理——引力、量子力学、标准模型——的理论。我们不打算继续讲解圈量子引力的有关方面。感兴趣的读者可以阅读附录文献中提到的一些参考书，以了解圈量子引力的有关知识。]

本章讲述的是弦论的基本思想。我们将从弦论那非凡的历史开始本章，最后我们讨论一下弦论为什么仍然没有成为物理学家期望的终极理论。

155

## 圈量子引力

圈量子引力（LQG）诞生于 1986 年，最先由宾夕法尼亚州立大学的艾伯埃·艾什特卡（Abhay Ashtekar），匹兹堡大学的卡罗·鲁瓦利（Carlo Rovelli）以及加拿大滑铁卢周长研究所（Perimeter Institute）的李·斯默林（Lee Smolin）等几位物理学家发展起来。在发展引力的量子理论方面，圈量子引力与弦论走的是截然不同的两种道路。

在弦论的大部分版本中，人们需要在确定的“背景空间”下进行计算，这样的空间就像是一个供粒子和能量表演的舞



台。这是一个牛顿式的观点。但是爱因斯坦的广义相对论告诉我们没有这种背景空间之类的东西，圈量子引力学家们就是用这种没有背景空间的方法来建立引力的量子理论。

在圈量子引力中，没有我们通常所理解的空间概念；实体是由“圈”组成，圈就是引力场力线的量子激发。这些圈的组合以及相互作用形成了所谓的“自旋网络”，这些网络演化成我们熟悉的平滑空间。

圈量子引力的物理图像与弦论中的物理图像完全不同，而且有关的理论发展的并不是特别充分。（或许这是由理论本身的社会学原因导致了一定的困难。弦论诞生于高能物理学的研究，而高能物理学一直就吸引着众多的研究者和基金；但是圈量子引力却是发端于广义相对论的研究，投入在广义相对论上的研究者数量和基金一直就很少。）不过即使这样，现在仍然有比较兴旺的圈量子引力研究群落。假如不能观测到超对称，假如质子真的不能衰变，假如不能发现更高的维度，那就一定会有大量的研究者转投到圈量子引力的研究中。

如同弦论一样，圈量子引力也有可能即将进入实验检验。比如，在圈量子引力中空间被量子化：在普朗克尺度上具有粒状的结构。这会导致高能区域上洛伦兹对称性的破坏——不同波长的光子可能以不同的速度运动，而这个现象是狭义相对论所不允许的。目前人们正在寻找这样的效应（见第十一章“时空真的是对称的吗？”小节）。

## 超弦的早期历史

失败乃成功之母。

吉赛拉·里克特 (Gisela Richter)

20 世纪 60 年代是令研究强相互作用的物理学家倍感挫折的 10 年。实验中产生了数以百计的强子——强相互作用粒子——每一个强子都有一些稍稍不同的性质。物理学家的挫败感来自于他们不能为这些强子分类，这一点意味着物理学家们没能建立强相互作用的量子场论。现在我们当然知道，这些强子中没有一个是基本粒子。只有将带色的夸克作为组成强子的最基本结构时，物理学家们才建立起成功的强相互作用理论。当物理学家们还不能用量子场论的方法很好地从理论上理解强相互作用时，一些物理学家试图通过另外的方法理解强相互作用。1968 年，当时在 CERN 工作的一位年轻意大利物理学家加布里艾尔·维尼齐亚诺 (Gabriele Veneziano) 写出了—一个方程式，该方程式能够描述几种实验上观测到的强子性质。两年之后，几位物理学家 [这几位物理学家分别是芝加哥大学的南部阳一郎 (Yoichiro Nambu, 图 74)，东京日本大学的后藤哲夫 (Tetsuo Goto)，哥本哈根尼尔斯·波尔研究所的霍奇尔·尼尔森 (Holger Nielsen) 和纽约耶希华大学的莱昂纳德·萨斯金 (Leonard Susskind)] 基于各自独立的工作，用另一种物理学观点重新解释了维尼齐亚诺的方程式。他们认为维尼齐亚诺的方程式描述的是一维客体“弦”。用这种方法来



图 74 南部阳一郎 [照片中站在右边的是南部阳一郎，与之交谈的是酒井吉荣 (Yoshihide Sakai)] 在粒子物理的对称性自发破缺以及强子的夸克模型中做出过贡献。同时，他也是最早探索相对论性弦论的人

看，强子不再是点粒子了，而是弦。这样的物理图像有其美妙之处。理论中不再有那些五花八门的粒子了，只有一种基本“原料”：弦。弦的不同振动模式就是不同的粒子。

逻辑上应该有两种弦存在。弦可以是开放的——两端自由的线段。诸如电荷与色荷之类的荷存在于弦的两个端点。按今天的说法，这样的开弦理论称为Ⅰ型弦论。弦也可以是封闭的——没有自由端点的环。荷存在于整个弦中。这种闭弦理论称为Ⅱ型弦论。（显然，我们想象得到将一个开弦的两端接到一起就形成了闭弦。因此，Ⅰ型弦论必然包含开弦与闭弦理论；但是闭弦不能抻开变成开弦，所以Ⅱ型弦论只包含闭弦。）

157

图 75 中所示的是两种不同的弦。其中 (c) 图与 (d) 图表示弦在时空中的运动。弦运动的时候，会在时空中展出二维

的世界面，正如点粒子会留下一维的世界线一样。开弦的世界面像一张普通的纸，闭弦的世界面则似圆柱筒的表面。

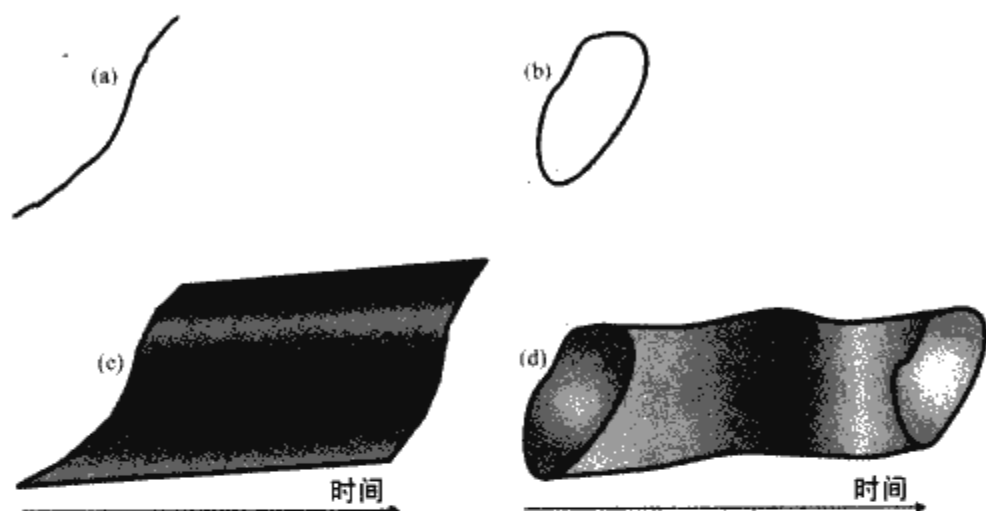


图 75 弦可以是如图 (a) 中所示的开弦，有两个自由端点；也可以是如图 (b) 中所示的闭弦，构成一个没有自由端的圆环。一条弦穿过时空的时候会划出一片两维的世界面，类似于穿越时空的粒子会划出一条世界线。图 (c) 表示的是开弦划出的世界面；而图 (d) 表示的是闭弦划出的世界面。

就像吉他弦或琴弦中有张力一样，人们在早期的研究工作中提出弦有硬度或张力（不过当然不同于乐器中的弦；粒子物理中的弦两端是不需要用什么东西固定的——张力是弦的内秉属性）。弦被“拨动”时，会按不同的谐波振动。振动的基谐波对应于一种类型的强子；一次谐波分量对应于另一种类型的强子；二次谐波分量又对应于其他类型的强子，等等。弦的能量标度依赖于其中的张力。比如，琴弦比吉他弦更硬一些，所以需要更多的能量才能振动。所以强子的基本能量标度由弦的张力决定；高次的谐波分量对应于更重些的强子。



更需要注意的是，维尼齐亚诺的弦是一种可伸展的物体，具有大小。弦的尺寸是弦的一个内秉属性，必须是  $10^{-15}$  米左右，只有这样才能符合强子物理的典型标度。与此相比，我们通常所说的粒子——比如质子——之所以有大小，是因为组成质子的类点粒子具有一定的空间分布。在粒子加速器上我们可以看到质子内部，发现它的组分夸克。但弦论的观点与之截然不同。弦中并不包含任何更小或更基本的东西。弦本身就是基本的，讨论弦是由什么组成的毫无意义。我们在引言中提到的所有一切的解释，最终都能指向弦，并且到此为止。

弦的想法非常有趣。在弦论出现在物理学家们面前之前，除了极少数的例外，大部分时候人们考虑的基本客体都是类点粒子。但是我们已经看到，点——没有尺度的物体——是会出问题的。一般来说，困扰量子场论的无限大问题根本上都是由基本粒子的类点性质造成的；事实上，如果某个物体是无尺寸的，那么无限大将不可避免。图 76 所示的为最基本的费曼图：两个人射粒子发射（或吸收）第三个粒子。这样的图有一个中断点。将两个或更多个这样的定点组合到一起，就能够表示更加复杂的过程。问题在于，定点相互作用发生在一点，所有的观测者看到的相互作用是同时发生的；即使对处于相对运动中的观测者——比如图 76 中的 A 与 B——也是如此。正是由于这种性质，一些费曼图会出现无限大的结果。对于标准模型的场论，我们可以通过重正化的办法去掉无限大，使得最后的结果是有限的。但是对于引力，重正化过程不起作用。如果图 76 中的粒子有一个是引力子，则微扰论的每一阶都会出现新的无限大。再次强调一下：相互作用的类点特性正是无限大疑



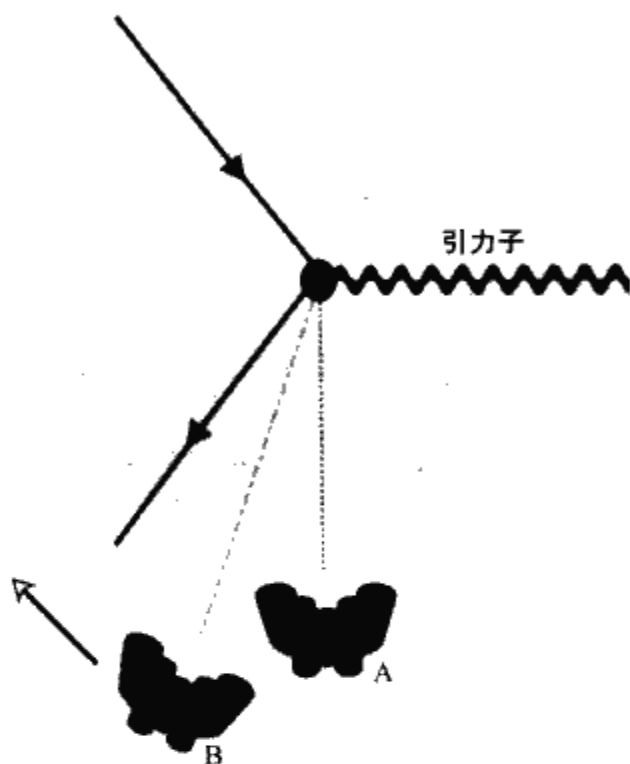


图 76 图中所示的是有自旋为 2 的引力子参与的相互作用顶点。将两个或多个这样的原始顶点组合到一起便可以表示与引力有关的物理过程。不幸的是，我们发现，正是由于我们画了这幅图使得理论中出现不可重正化的无限大，从而导致理论不能给出有意义的结果。从根本上讲，之所以有这样的麻烦，问题在于出现了一个中断点：相互作用是发生在某一点上的。在观测者 A 看来，观测者 B 处于运动中。但是两个观测者都会认同彼此给出的相互作用发生时间。正是场论中自旋为 2 的引力子的类点行为导致了各种麻烦

难的根源。

我们转过头再看一下两条弦结合产生第三条弦的过程。如图 77 所示，这样的图中没有中断点。整个相互作用平滑的发生。在这种情况下，人们无法定义两条弦相交的精确时刻，因

159



为世界面上的点的时间坐标定义取决于不同的观测者。换句话说，关于弦的相交时间，两个不同的观测者会得到两个不同的结论。这样会使理论“平滑”，不会产生无限大。

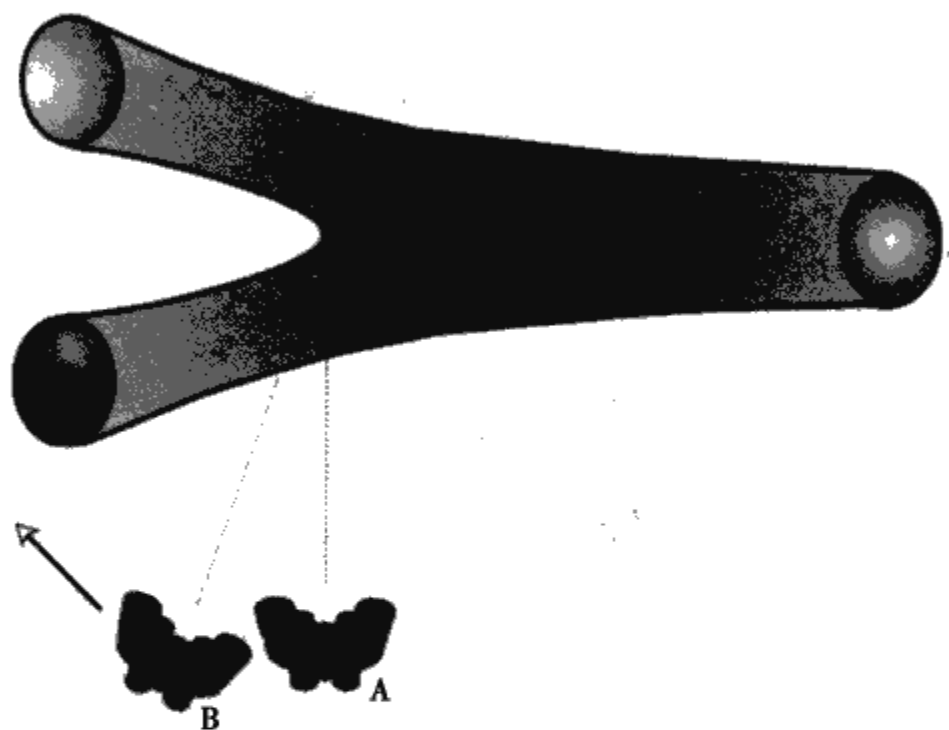


图 77 图中所示的是两个相互作用中的弦——场论顶点的弦论等价物。这种情况下，处于相对运动中的两个观测者定出了不同的相互作用起始时间。两条弦没有明确定义的相互作用时刻，相互作用“平滑过渡”，没有中断点，而且困扰场论的无限大问题也不会出现

就像我们用费曼图来计算标准模型的过程一样，为计算特定的弦论过程的发生概率，我们还要用到微扰方法。弦论中，高阶图对应于世界面中洞（或者柄，handle）的数目。图 78 所示的就是微扰论中一个典型的三阶弦论过程。

图 78 有一个很不错的特点，那就是微扰论的每一阶只对



图 78 弦微扰论中的一个典型过程。在每一阶都会出现一个新的“孔眼”。微扰论的每一阶都只有一个图，计算两个“洞”以上的图会极度复杂

应于一个图。这一点与标准模型比起来自然好得多，因为在标准模型中，随着阶数的增加，图的数目如雨后春笋般迅速滋生。不过坏消息也接踵而至：在数学上，处理两个柄以上的图是极为困难。不过，弱耦合常数时，微扰方法还是能够帮我们理解弦论的一些性质（理论的非微扰不能在这种方法中显现出来——就像夸克禁闭的问题超出了微扰 QCD 的范围一样）。

南部、后藤、尼尔森和萨斯金曾讨论过真实弦的相互作用。在他们的模型中，诸如 CERN 的粒子加速器中彼此碰撞着的并不是点粒子，而是弦。弦可以彼此相互作用产生新的弦。他们的弦论模型似乎为强子相互作用提供了一种合理的解释。除了这一鼓舞人心的结果，他们的弦论模型的高能行为也胜过了其他的竞争理论。在粒子加速器运行的能量区域，弦看起来像类点粒子：按传统的类点相互作用和按弦论的观点分析将会得出相同的结果。但是在高能区域，两种物理图像就会产生分歧：按传统观点来看，随着能量的不断提高，所能探测的尺度也将越来越小，不过计算结果中会出现无限大；按弦论的观点来看，更高的能量只能将弦激发到更高的振动模式上。理论的高能区域完全不同，无限大的计算结果不会出现。

尽管弦论模型看起来像是个很有前途的强子理论，它还是



有些问题的。

问题之一在于原始的弦论模型描述的只是玻色子。玻色子弦可以描述介子，比如  $\pi$  介子  $\rho$  介子之类的粒子；但却不能应用到费米子上。因而玻色子弦不能解释质子或中子这样重要粒子的存在。1971 年，为了解决这个问题，几个物理学家——普林斯顿大学的安德列·纳瓦尔与约翰·施瓦茨（图 79）以及独立工作的皮埃尔·雷蒙德发展了另一个版本的理论——自旋弦论，这个理论可以将费米子纳入其中。

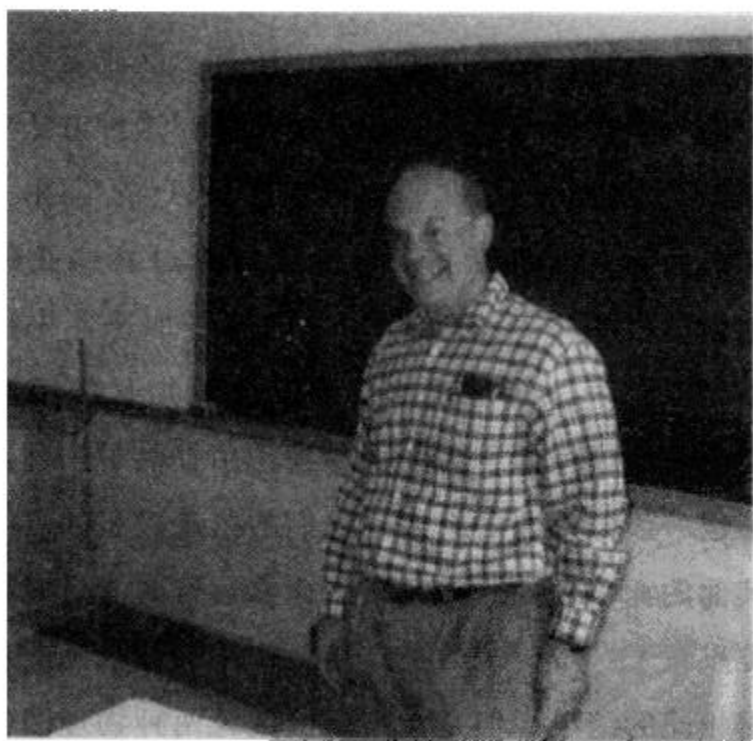


图 79 约翰·施瓦茨是加州理工大学的一名教授。35 年来，他一直是弦论的领军人物之一

第二个问题是弦论只在有更高维度的时空中才有意义。就像许多物理问题一样，这一问题的原因与对称性有关；与之相

关的是一种美丽的对称性——共形对称性。早前已经提到，点粒子穿过时空会描绘出一条世界线。我们可以用一个与诺特定理有密切关系的定理很好地描述粒子轨迹，这个定理说的是：沿世界线运动的粒子具有最小的作用量（作用量具有能量乘时间的量纲）。粒子的作用量正比于其世界线的长度。

我们可以按类似的方式处理弦的运动。按传统观点，在时空中运动的弦按其作用量最小的路径运动。弦的作用量正比于弦所划出的世界面的面积。所以作用量取所允许的最小值意味着世界面的表面积也要取最小的可能值。世界面的面积不能依赖于我们在世界面上选取坐标的方式；在世界面上坐标变换后我们一定会得到相同的面积。这种对称性——世界面坐标变换下物理理论的不变性——就是我们前面提到的共形对称性。

162

不幸的是，当我们用这样的一些思想构建量子理论时，会发现破坏共形对称性的过程。这样的过程称为共形反常。反常的出现是一个量子理论崩溃的真正标志，不管是哪种反常都是如此；理论不自洽，就没有任何意义。不过，人们有的时候会发现反常在某些情况下可以消除。一旦反常消除，量子理论具有自洽性，你就至少可以在这一思想的带领下前进得更远一些。本质上，玻色子弦论所有的共形反常都可以消除——前提条件是弦论存在于二十六维时空中。类似地，所有自旋弦论中的反常也可以消除——不过弦论要存在于十维时空中（见图80）。这些结论毫无回旋余地。要使理论有意义，时空要么是二十六维（玻色子弦论），要么是十维（自旋弦论），而且弦要在所有的空间维度中都能振动。从某种意义上讲，这是一个极为激进的结果：开天辟地，数学自洽性条件决定了时空的维



数。虽然这两个数都不是四——我们观测到的时空维数，不过这并不是理论的一个缺陷：我们已经知道了早在几十年之前，卡鲁扎-克莱因理论就已经提出了更高维度的存在并解释了没有观测到的原因。然而，对于一个强子相互作用理论来说，时空非得具有十维或二十六维这样的要求似乎有些过头了。

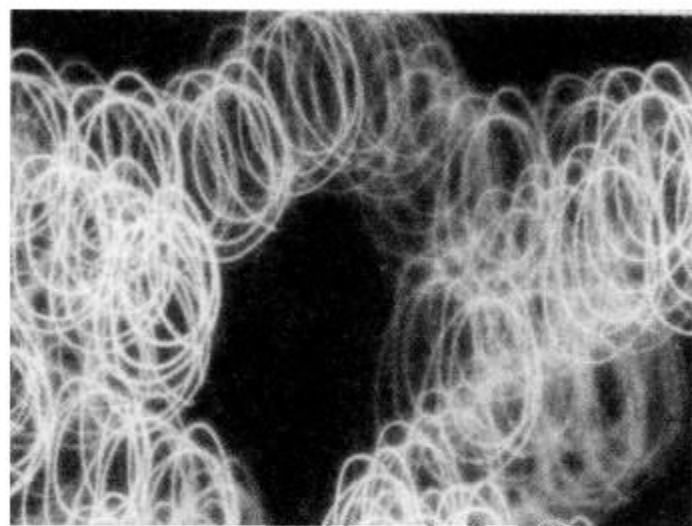


图 80 弦论中的基本实体是一维的弦；这些弦彼此之间相互作用；弦的振动就是熟知的标准模型粒子。不过，要是弦论中既包含费米子又包含玻色子，则弦就必须存在于十维时空中。所以任何将弦可视化的尝试——比如本图——最多只能是深层真实性的一点提示

弦论的第三个问题是弦的低能态看似应该是快子——比光速还快的粒子。它几乎就是理论不可能是真实理论的确信信号了。理论的另一个问题是量子力学效应能够使振动弦中的能量相消。简单地说，弦论中最低质量的粒子能量应该正比于弦中的张力；但是在某些情况下，精确的能量相消只留下了无质量粒子。如果你对光子感兴趣或许会对此不以为然，因为光子就

是无质量的；不过处理强子问题时就糟糕了，因为没有**一个强子是无质量的**。

最后，1973年的时候，弦论遭遇到强大的竞争对手，这是致命的一击。1973年，人们已经将量子色动力学接受为强相互作用的正确理论，至少在对撞机所能提供的能量尺度上如此。可以简单地把强子看成是类点夸克的束缚态。在描述强子物理上，QCD理论迅速取得了弦论所不能取得的巨大成功，毫不奇怪，大部分物理学家立即放弃了弦论转而投身到QCD理论中。只有少数人仍保持着对弦相互作用的热情，不断努力，使之继续喷溅着思想的火花。

163

约翰·施瓦茨和乔·舍尔克就是两个继续探索弦论思想的物理学家。他们被自洽的弦论所展示出的美妙对称性深深触动；施瓦茨和舍尔克确信如此丰富的数学结构在物理学上一定有其用武之地。1974年，两人证明无质量弦的物理态自旋为2。他们发现这个无质量的态并非是弦论的绊脚石，它可以像引力子一样相互作用〔大约同时，东京大学的米谷民明（Tamiaki Yoneya）也独立地发现了这一结果〕。弦论或许可以将广义相对论纳入其中；事实上，从弦论的角度看，理论本身似乎需要引力的存在！并且，其他的力可以看成是另外无质量弦的态。

从引力子模式来估计弦的张力，会发现结果是一个巨大的数： $10^{39}$ 吨。〔与此相比，钢琴中弦的平均张力是160磅（1磅=0.4536千克）；达到音乐会所需要音高的钢琴中，总的张力不过21吨。〕如此巨大的张力会使弦收缩到 $10^{-35}$ 米的普朗克长度。施瓦茨和舍尔克做了一个大胆的猜测：或许弦论完全被



用错了地方。出于解释强子物理需要，人们假定弦的典型尺度是  $10^{-15}$  米；不过，如果弦的典型尺度是  $10^{-35}$  米的普朗克长度的话，弦论就有能力解释所有的基本相互作用！弦论是统一理论的候选者！

乍看之下，这样的想法有一个明显的问题。弦振动的基谱模式会导致一个具有普朗克质量  $10^{19}$  GeV 量级的粒子；下一个振动模式会导致一个 2 倍于普朗克质量的粒子；再下一个振动模式会导致一个 3 倍于普朗克质量的粒子，以此类推。但弦的振动本应产生中微子和电子之类的粒子，它们的共同特点是有很小的质量——与普朗克质量相比，这是些极小的质量。一个可能的答案是：导致引力子之类零质量态的量子力学相消机制同样导致了电子之类的非零（不过却很小）质量态。在引力子的情况产生的是精确相消；而对于电子，只能说是近似相消。如果弦论是真正的统一理论，那么它要回答的就不仅仅是电子质量的问题。还有标准模型中所有其他的基本粒子形形色色的质量模式。当时的施瓦茨和舍尔克不知道如何处理这个问题，今天也没人知道如何回答这个问题。标准模型中的粒子质量起源与弦论的近似相消这一问题还没有得到确证；或许这个问题的细节可以留待后人解决。对于我们来说，振动的弦会生成我们所认为的基本粒子的质量，这至少是一种我们能够想到的可能性。就像振动的弦会产生引力子一样，它也能生成所有的标准模型粒子——夸克、轻子、规范玻色子。不管怎么样，这都是一个激动人心的创见。

物理学家们被施瓦茨和舍尔克的统一建议深深打动了。一些物理学家继续探索弦论的性质，并在这个过程中展示出了巨



大的勇气。当没有人能告诉你一种想法将通向何方的时候，你是很难追寻它的足迹的。比如 1976 年的时候，在舍尔克与巴黎高等师范学校的费迪南德·格利奥兹（Ferdinando Gliozzi）和 CERN 的戴维·奥利弗（David Olive）的合作中，他们发现自旋弦论中的态可以超对称化处理——因此可以有相同数目的费米子与玻色子。他们还证明了新的理论中完全可以没有困扰玻色子弦论的快子。但在此之后，弦论的研究差不多被完全废弃了。（舍尔克继续对物理学贡献着自己的能量；从前面的章节中我们知道，他也是十一维的  $N=1$  的超引力的作者之一。不幸的是，由于悲剧性的境况，舍尔克于 1980 年去世，年仅 30 岁。）

弦论主要的拥护者约翰·施瓦茨找到了另一个合作者，其时还在伦敦大学玛丽女王学院的英国物理学家迈克尔·格林，格林与施瓦茨继续着探索弦论的孤独征程。与瑞士物理学家拉斯·布林克（Lars Brink）一道，他们发展了具有超对称的自旋弦论，并且发明了超弦理论。根据理论所具有的超对称的数目的不同，超弦理论可以分为好多种。具有  $N=1$  的超对称的理论是 I 型理论；具有  $N=2$  的超对称的理论是 II 型理论。如其母理论，超弦理论也仅当存在于十维时才有意义。（不过同样如其母理论，超弦理论并未引起大多数物理学家的兴趣。不过还是有少数人注意到了。比如 1982 年，威滕读到了施瓦茨所写的一篇超弦评论文章。仅仅要求超弦理论具有数学上的自洽性就会导致引力的产生，这一认识被威滕视作生命中“最伟大的智力震撼”。不过，大多数的物理学家还是忽视了弦论的存在。）之后，1984 年 8 月，格林与施瓦茨敲响了金钟。他们

165



那年发表的论文触发了“第一次超弦革命”（图 81）。



图 81 约翰·施瓦茨（坐在最左边）与迈克尔·格林（前排紧挨前者）两人在理论物理其他领域的多年研究后，逐渐对弦论产生了兴趣。1984 年，两人合作的一篇论文掀起了弦论研究的高潮

## 第一次超弦革命

所有语言中最富于英雄气概的词就是革命。

尤金·戴布斯 (Eugene Debs)

处理掉超弦理论的各种麻烦，并且推出了一个在统一引力和其他相互作用方面似乎有很多优点的超弦理论之后，弦论学家们遭遇了一个几乎将超弦扼杀的问题。问题在于任何超弦理论必须遵循一些经验限制。比如一个很明显的限制就是必须只有四个可观测的维度。不过这并无大碍：卡鲁扎-克莱因的紧致化方案就可以解决这个问题；另一个更强的限制是理论必须

最终产生弱相互作用中已经观测到的手征性。

如我们早前讨论过的，弱相互作用具有“手性”，或者说手征性。我们可以观测到弱相互作用的某些效应，却不能观测到这些相互作用的镜像反转效应。在四维时空中构建一个具有手征性的量子规范理论一定要小心翼翼。你或许会写出一个理论，但却在这个理论中发现了能破坏规范对称性的费曼图。这样的图会破坏一些我们最钟爱的物理定律——比如会产生破坏电荷守恒定律的过程。我们称这样的理论具有手征反常。一个理论如果具有手征反常，那我们就可以立即将它扔进废纸篓里了。人们发现标准模型就具有手征反常图，这些手征反常图是理论潜在的威胁。不过幸运的是，标准模型的手征反常图可以完全被另一些图消去。事实上，这也正是夸克为什么成对出现的原因。比如有一个  $u$  夸克，就有一个  $d$  夸克；同样地，有  $c$  夸克，就有  $s$  夸克；有  $s$  夸克参与的反常图总是被有  $c$  夸克参与的类似的反常图消去。因此标准模型是自洽的，并不受手征反常影响。

如果在四维中构建一个手征理论很困难的话，那么在更高的维度构建一个既具有手征性又不具有手征反常的理论几乎就是不可能的。实际上，很多物理学家的确认为不可能构建一个十维的无手征反常的超弦理论；如果这些物理学家观点正确的话，那么手征反常就足以扼杀整个超弦思想。

如今，所有人都承认写出一个十维时空中的手征理论至少具有理论上的可行性。事实上，只有在偶数维时空（更准确的说法是，一维时间，奇数维空间）中才能定义手征性的概念。当然，这也是对称性的要求。手征性依赖于空间轴上连续镜像



167 翻转变换时的情况。如果空间是奇数维，则需要考虑的镜像翻转就是奇数个。于是左手研究对象就会变成右手研究对象。一维中的镜像反转是很明显的：你的左手变成了你镜像的右手，反之亦然；简单的运算总结之后，你会相信三维中也是如此。而在偶数维的空间中，连续的镜像变换后研究对象的手征性未发生改变。所以，九维空间（十维时空）中的超弦理论至少在理论上具有成为手征理论的可能性。不幸的是，一个高维理论即使开始的时候具有手征性，在额外维度紧致化后，手征性也会消失。除非高维手征理论已经囊括了规范对称群以及引力，否则你是不可能得到四维时空中的手征性的（纯卡鲁扎-克莱因理论并非如此，在纯卡鲁扎-克莱因理论中，我们观测到的对称性来自于紧致空间的对称性）。

格林与施瓦茨于 1984 年证明可以在十维时空中构建一个既具有手征性又没有手征反常的超弦理论。不过对称性对理论提出了极强的要求，手征反常排除了大部分的理论。事实上，仅当规范群是  $SO(32)$  时，超弦理论才可能存在。格林与施瓦茨同时证明了如果规范群是  $E(8) \times E(8)$ ，也会出现反常相消，不过他们并没能构建一个具有这种对称性的超弦理论。综上所述，只有两种群能保证超弦理论的自洽性： $SO(32)$  和  $E(8) \times E(8)$ 。格林与施瓦茨的工作充满了复杂精巧的技术细节，看起来并不是通常的大众款式，但还是激起了超弦理论的研究热潮——这就是所谓的第一次超弦革命。现在让我们仔细地回顾一下格林与施瓦茨是如何得到他们的结论的，只有这样，我们才能了解他们两人的结果为什么这么重要，以至于能够掀起一场弦论研究的风暴。

我们从一个很简单的想法出发：宇宙的基本实体是一维的弦，这些弦分离与融和，彼此之间有着量子相互作用。仅仅带着这样的基本想法，我们尝试着去构建一个自洽的理论，我们发现所得到的理论并没有立即与我们所观测到的现象矛盾，并且具有极其丰富的理论性质。

我们得到的是一个必然包含超对称的理论，而超对称是粒子物理中最美妙的对称性之一。

这个理论受到很强的限制，没有可调的外部无量纲参数，只有一个基本的能量标度——弦的张力，所以理论本身并没有什么回旋余地。

看起来困扰着点粒子量子场论的无限大对这个理论并不起作用：我们所得到的的是有限的，逐阶近似的微扰论。

这个理论同时要求了引力的存在，于是我们得到了统一引力与其他的力的机会。为了这个机会，物理学家们已经奋斗了数十年。

这个理论比点粒子的观点更加优雅：抛弃那些过多的基本“原料”，我们只有一种弦作为基本实体，弦的不同振动模式对应的就是我们观测到的不同粒子。（由于弦有无数种振动模式，所以也有无限种“基本粒子”。这一点并不是问题：比较高的振动模式对应粒子的质量是普朗克质量的量级——根本就是不可观测的。理论中这些极大质量粒子的存在消除了场论中无限大的存在。）

我们还能够预言时空的维度——那就是十。于是我们就自然地得到了更高维度的思想，十维中的六维太小以至于不能观测到。

168



完整的十维理论中的规范群可以提供我们四维世界中观测到的全部对称性。只要理论没有规范反常，我们就会得到一个很强的限制，使得我们可以统一规范群。在无限种可能的规范群中，只有两种会逃过规范反常的限制。统一的规范群并不是唯一的，要么是  $SO(32)$  群要么是  $E(8) \times E(8)$  群。不过这已经相当接近最终解决了。

最后，让我们来取弦论的低能或者说长距离极限（虽然与我们所能触及的对撞机能量相比仍然是很大的能量；但是与弦在普朗克能量时的振动模式比却是低能）。低能时，我们应该看不到弦延展的一维性质；我们可以合理地将一维的弦假定为零维的点粒子。以此近似为前提，我们用前几章中学过的量子场论来处理点粒子的问题。也就是说，真正的高能理论是超弦理论；其低能有效理论为点粒子的量子场论。并且超弦理论的有效低能理论就是十维中的超引力！但是因为不具有可重正化性，超引力不可能是最终的统一理论；但超引力却可能是终极理论——超弦理论——的有效低能理论。从这个物理图景看来，70年代早期的超引力先锋人物曾初窥统一理论的面纱，而这个统一理论就是超弦。（这里还有一个小小的问题：目前为止最好的超引力理论是十一维的，可是超弦理论却排除了这个维度。从超弦的角度看，这个独一无二的美妙理论只会引起数学上的一点点好奇心，但在物理学中并不扮演实际角色。在第一次超弦革命的喜悦气氛中，大多数的物理学家都能够容忍这小小的不和谐音符。）

对于很多参与了第一次超弦革命的物理学家来说，大自然似乎将超弦理论选为唯一能够统一引力和其他的力的理论。大

部分物理学家们又一次已经感觉到他们已经触摸终极的统一理论了。

## 硕果累累的革命

在弦的嗡鸣中隐藏着几何。

毕达哥拉斯 (Pythagoras)

对于超弦革命，参与了发展标准模型的物理学家们观点不一。首先提出电弱统一理论的格拉肖对超弦理论很是苛责。谈起超弦理论他的评价是“物理学家们总是有争相蹦上理论花车的习惯，超弦理论就是一个具有社会学意义的有趣例子”。另一方面，最终完成了格拉肖所勾画的标准模型理论蓝图的萨拉姆与温伯格则对超弦理论表现出巨大的热情。他们一听到反常相消的信息，便立即投身到超弦理论的研究中去。而他们两人代表的是大多数物理学家的态度。如雨后春笋般，全世界到处都有投身于超弦的物理学家了。

在格林与施瓦茨的奠基性工作之后不久，普林斯顿大学的一组人发现了一种新型的超弦理论；这组人很快就成了闻名遐迩的“普林斯顿四重唱”，其中包括戴维·格罗斯 (David Gross, 图 82)，杰弗里·哈维 (Jeffrey Harvey)，埃米尔·马丁内奇 (Emil Martinec) 与瑞恩·罗姆 (Ryan Rohm)。他们将这种新型的超弦理论称为杂化弦 (heterotic string)，名称来自于基因学中的杂种优势 (heterosis)，其意为交叉繁殖的动植物具有比亲代双方更强优势的趋势。杂化弦这一名称恰当地

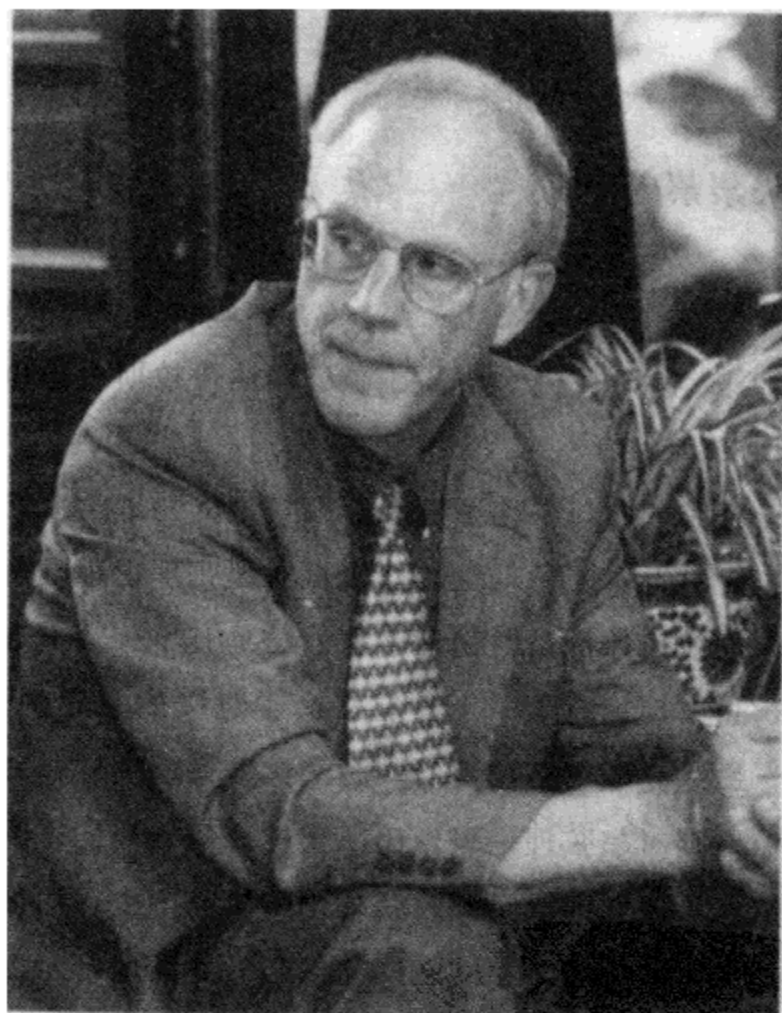


图 82 戴维·格罗斯，他与弗兰克·维尔切克发现 QCD 具有渐近自由的性质，另外戴维·普利策也独立发现了这一性质。正是由于这一性质的发现，人们才最终接受 QCD 为强相互作用的正确理论。后来，格罗斯又成为著名的“普林斯顿四重奏”——发现杂化弦的四位理论物理学家——中最资深的一位。有一段时间，人们认为杂化弦可以提供一个将引力与其他基本相互作用统一起来的基本理论

表现了其为玻色弦与超弦混杂体并且比两者都具有更强性质的特点。杂化弦是一种怪异的调和产物，但是它撑起了物理学家



们追求统一理论的希望。

普林斯顿四重唱的理论出发点为：弦是闭的（因此荷布满整个弦，而不像在开弦中那样只存在于端点）并且是**可定向的**（这就是说当你沿着弦运动的时候你可以知道自己正在向着哪个方向前进）。振动可以沿着两个方向绕弦传播：顺时针方向及逆时针方向，或等价的右运动模式或左运动模式。关键在于，我们对杂化弦的两种振动模式区别对待；右运动的和左运动的振动模式存在于不同的世界中。杂化弦中，右运动的具有超对称性并且存在于十维时空；就如同我们一直讨论的闭型超弦；左运动的不具有超对称性并且存在于二十六维时空，如同原始的玻色型弦论。为使杂化弦有意义，二十六维的玻色型弦论必须约化到十维时空。普林斯顿四重唱将二十六维时空看成是一个十维时空与“蜷曲”的十六维时空的乘积；通过这一过程他们成功地约化了理论。最终的结构是存在于十维时空的研究对象，就像我们一直讨论的超弦一样。不过，另外十六维蜷曲方式的限制对理论提出了很强的要求；如果理论具有自治性，则必须是  $SO(32)$  或  $E(8) \times E(8)$  这两种对称性中的一种。而这正是格林与施瓦茨挑选出来的群！

170

这样十维中可能的杂化弦就只有两种： $SO(32)$  杂化弦和  $E(8) \times E(8)$  杂化弦。而与我们的观测相比，十维仍然多了六维。为了与现实接轨，多出来的六维必须紧致到足够小的水平上以使我们不能观测到它们。超弦理论的很多对称性都要求紧致化的空间要具有某些限制性的性质。事实上，人们有足够的理由相信这样的空间必须是所谓的卡拉比-丘流形 [或这种流形的推广如轨形 (orbifold)]。早在超弦理论诞生之前的 1954

171



年，尤奇尼奥·卡拉比（Eugenio Calabi，图 83）就猜测过这种特殊的空间类型在数学上是存在的，1976 年，丘成桐（图 84）证明了卡拉比猜想（图 85）。原始的卡鲁扎-克莱因理论要求在时空中的每一点都有一个小环的存在。在弦论中也需要有类似的东西，只不过不再是环，而是在时空中的每一点都要有一个卡拉比-丘流形存在（图 86）。

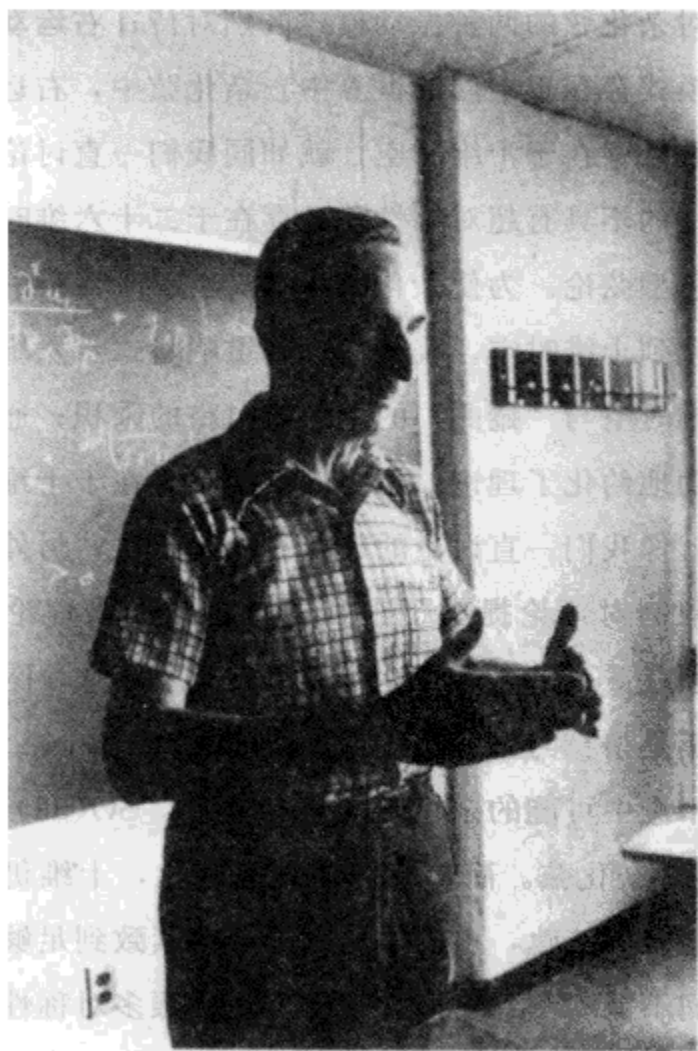


图 83 1954 年，意大利裔美国物理学家尤奇尼奥·卡拉比猜想存在某种特别的流形。数学家们花了 22 年才最终证明卡拉比猜想的正确性



图 84 华裔美籍数学家丘成桐是一位菲尔兹奖获得者，他还获得过其他一些享有很高声望的奖项。1976 年，丘成桐证明了尤奇尼奥·卡拉比于 1954 年提出的一个猜想，这一猜想认为存在某种具有特别性质的空间。现在这些特别的空间被称为卡拉比-丘空间

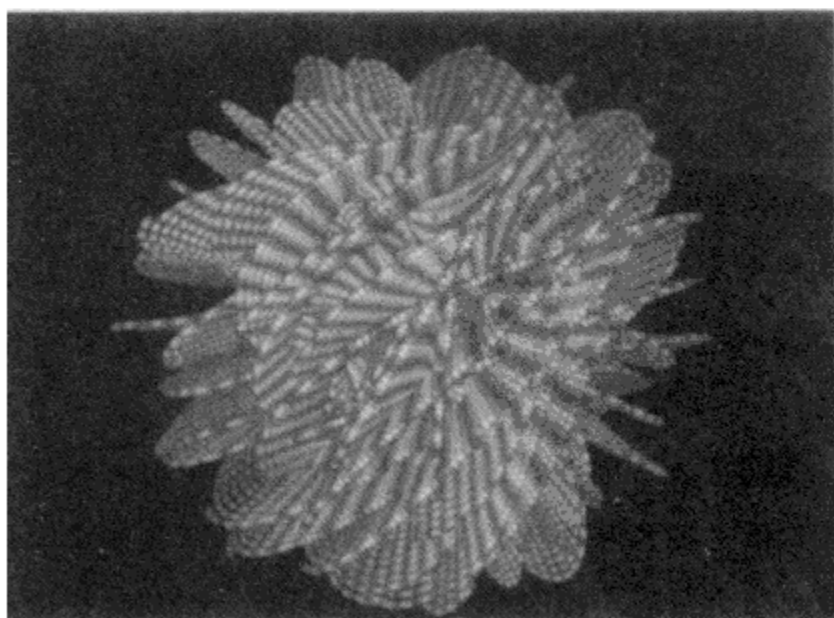


图 85 六维卡拉比-丘空间的一个例子。图的作者试图用二维图像来表达一个更高维度对象的三维透视图！显然这样的一张图只能略微显出一点卡拉比-丘空间复杂性的风味

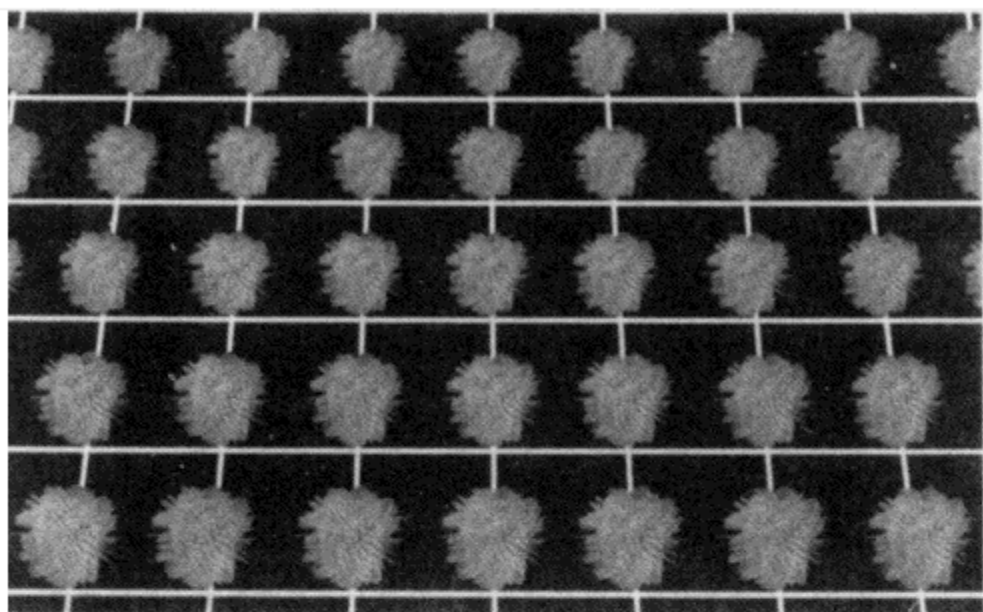


图 86 超弦理论要求我们想象在空间中的每一个点都有一个六维卡拉比-丘流形；这一点倒很像额外维中的情况——原始的额外维理论要求我们想象在空间中的每一个点都有一个环

当额外维度被紧致化的时候，引力仍然存在于我们的低能四维世界；紧致化不能毁掉引力相互作用。而且，弦论看起来很像具有  $SO(32)$  或  $E(8) \times E(8)$  规范对称性的规范场理论。物理学家们之所以关注  $E(8) \times E(8)$  理论，是因为例外群  $E(8)$  的一个子群是  $E(6)$ ；而我们知道， $E(6)$  是一个很好的大统一群候选者。因此， $E(8) \times E(8)$  杂化弦很有可能统一引力以及其他三种相互作用。其实，就在普林斯顿四重唱推出他们理论的四个月后，威滕和他的三位同事——其时在得克萨斯大学的菲利普·堪德拉斯 (Philip Candelas, 图 87)，加利福尼亚大学圣巴巴拉分校的加里·霍洛维茨 (Gary Horowitz, 图 88) 以及普林斯顿高等研究所的安德鲁·斯特劳明格 (An-

172

drew Strominger) ——一道发表了一篇论文。文中，他们将  $E(8) \times E(8)$  杂化弦理论与我们在低能时观测到的现象联系了起来。在他们的模型中，特别的卡拉比-丘流形使得  $E(8) \times E(8)$  规范群破缺成  $E(6) \times E(8)$  群；同时，保有  $N=1$  的超对称性。也就是说，他们得到了一个具有  $N=1$  的超对称性以及  $E(6) \times E(8)$  规范对称性的四维有效理论。

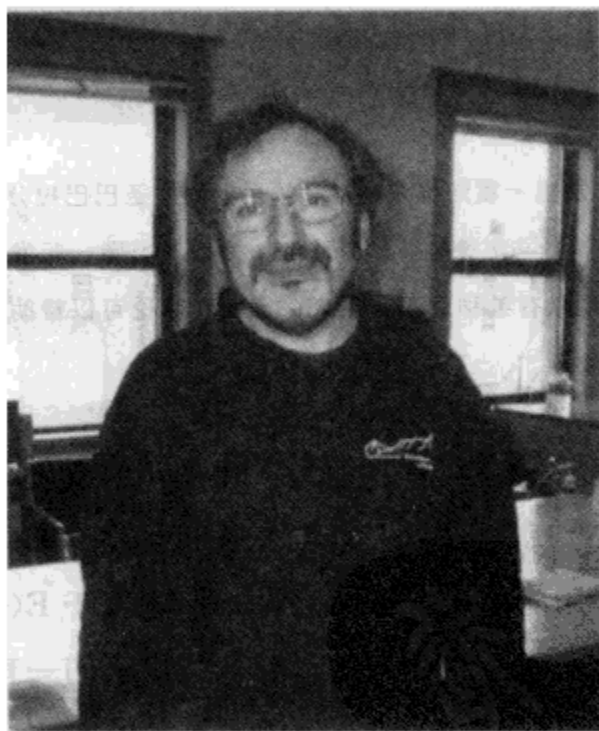


图 87 菲利普·堪德拉斯是牛津大学数学研究所的一位教授。1984 年堪德拉斯还在得克萨斯大学奥斯汀分校，他与霍洛维茨、斯特劳明格以及威滕合作提出了一套方案，在这套方案中，杂化弦有可能与可观测的现象有某种联系

这一发现或许是第一次超弦革命的顶峰。从十维中的超弦理论出发，最终得到四维的超对称大统一理论（而且还加上引



图 88 加里·霍洛维茨是加利福尼亚大学圣巴巴拉分校的一位教授。1984 年，他与堪德拉斯、斯特劳明格以及威滕一起发现杂化弦可能与可观测现象有某种联系。后来，他发现弦论可以帮助我们理解与黑洞有关的物理

173

力)。这个模型还有其他一些好处，比如，紧致化产生了  $E(6) \times E(8)$  群； $E(8)$  所描述的是能与真实世界的“ $E(6)$  物质”通过引力相互作用的物质。也就是说，那些属于  $E(8)$  的物质完全不受电磁力、强力和弱力的影响，所以我们一直没能观测到这些物质。我们也会顺理成章地得出这样的看法：既然宇宙学家知道宇宙中有暗物质的存在，而物理学家又不能解释暗物质的起源；那么好吧，这些“ $E(8)$  的影子物质”其实就是暗物质。于是这个理论显得更好了。如果你为卡拉比-丘流形选择一种特殊的拓扑结构，那么你将得到粒子究竟有几代的答案：如果紧致的卡拉比-丘流形有三个“洞”——就像甜面包圈有一个洞——则我们在大的四维世界中观测到的粒子就将有三代！没有任何其他的理论能够这么简单地解释为什么我们观测

到的粒子有三代了。总共有上千种卡拉比-丘流形（数学家们还没能告诉我们到底有多少种），其中的大部分预言的代数都太大；不过也有一小部分空间能够产生我们观测到的三代粒子。并且根据那些相同的空间拓扑结构，有理由期望  $E(6)$  大统一群能够破缺到标准模型的  $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ 。

紧致在六维卡拉比-丘流形上的  $E(8) \times E(8)$  杂化弦，看起来好像就是我们所要追寻的统一理论。

不过，就像以往一样，这一理论还是有一些问题的。

上面描述的图景在 1985 年能够引起物理学家们的兴奋之情是有其原因的：这是一个几乎能够描述真实物理世界的统一理论。事实上，理论中的一些要素也许真的就是对的。不过，大约 20 年之后，我们既能够指出理论图景中的任意性，也能够找出那些不起作用的要素。即使在当时，第一次超弦革命之后，很快就有物理学家指出他们所发现的理论缺陷。

格拉肖和其他的一些人认为超弦理论过于数学化了，或许更适合纯数学家而不是物理学家。看起来理论不能给出任何可检测的预言，这样的理论完全没法证伪；在这个角度来看，这个理论甚至都没法错。（数学家们自然不必关心他们的理论是否能经得起实验推敲，他们所关心的全部就是超弦理论所秉承的数学结构，根本不在乎超弦理论是否真的能够描述客观世界。这样的情况一直持续到今天，对超弦理论的探索的确获得了硕果累累的数学成就。）

事实上，某些超弦模型还是能够给出一些未来某一天可能检验的预言。比如，一个比较一般性的预言是：存在一个中性的矢量玻色子——就像  $Z$  玻色子那样，只不过要重些。不过即

174

175



使真的发现这样的矢量玻色子，也不能就说是证明了超弦：在很多其他的非超弦机制中也有可能存在这种重的中性矢量玻色子。随着物理学家们对超弦的认识进一步加深，人们逐渐发现超弦的情况并不像格拉肖或其他人认为的那么糟糕。但是 20 年之前，人们就发现超弦的想法似乎完全没有得到检验的机会；即使在今天，可能实施的实验检验也存在争议。

假如我们最先发现的超弦理论，然后才是其他的物理学，那么我们或许会深深地被超弦理论所打动。我们已经看到一个基于超弦思想的自洽理论是如何产生那些丰富的理论性质的。假如我们最先发现的是超弦理论，那么我们就得到三个基本预言：规范理论、广义相对论与超对称。不幸的是，我们已经先知道了规范理论和广义相对论，所以不能将这两个理论的存在当成是超弦理论的证明。超弦理论最多算得上是这两个理论的事后解释。如果在 Tevatron 或 LHC 上能够发现超对称，那么显然会再次掀起超弦理论的研究热潮；但即使这样也并不代表超弦理论已经确凿无疑地得到检验了：大自然完全可以只具有超对称性而与超弦理论毫无干系。综上所述，弦论的这些特性虽然可以激发人们对其不断探索的热忱，但却不能肯定地告诉我们超弦就是我们所要追寻的统一理论。

超弦理论还有其他的问题，当人们试图建立一个能与现实世界联系起来的超弦模型时，引入了太多的任意性。基本的统一理论应该可以允许我们计算基本问题的答案，而不是像现在这样：先从实验上测出一些东西，然后将这些用手放回到理论中。比如，为什么只能有三个大的空间维度？为什么我们观测到的不是四个空间维度也不是五个，或者最大值之下的任何一



个空间维度？仅仅用我们熟悉的微扰方法并不足以回答这些一般性问题。超弦理论中有一个基本常数——超弦耦合常数。如果这个常数远小于 1，则我们可以忽略具有很多个洞的图（图 78 中的复杂图形），于是可以很快地算出精确结果。不过要是这个常数大于 1，那么我们没有信心用微扰论得到我们需要的结果。不幸的是，没有人知道超弦理论中的耦合常数究竟应该是多少。该常数取决于伸缩子场的尺寸（讨论卡鲁扎-克莱因理论时我们曾提到过伸缩子场）。没有任何理由要求伸缩子场非得很小，所以在微扰论的框架下，我们不一定能使用一个真正的弦论精确地分析我们的低能四维世界。为了更好地理解超弦理论，也为了能够更加确信它的有效性，我们必须去了解超弦理论的微扰方面。显然，这并不是个简单的任务。

超弦理论的另一个困难（直到今天都是难题）在于卡拉比-丘流形，这个超弦理论紧致化在其上的六维流形实在太复杂了。有几千个卡拉比-丘流形，而每一个都有不同的拓扑结构（流形上有洞、柄、通道）。假定人们可以确定其拓扑结构，是否问题就简单些了呢？没错，确实简单了些，不过只是简单了一点点。一个具有特别拓扑结构的卡拉比-丘流形仍然有几百个参数——所谓的“参模”——用以描述不同紧致维度的尺寸和形状。卡鲁扎-克莱因伸缩子就是参模的一个例子；伸缩子确定的是一个额外维度的紧致半径。超弦理论中有很多这样的参模，这些参模以标量场的形式出现在我们的三维世界中，可以决定局域物理条件。卡拉比-丘流形上的一组参模生成了具有特殊参数值的理论；这些参数可以是粒子质量，相互作用的耦合常数，等等——那些我们想要解释的标准模型中的几类

177



参数。我们当然盼望着超弦理论的方程将某组特殊的参模挑选出来。不幸的是，我们并未得到这样的答案：参模所有的值都会给出数学上自治的理论。目前，我们既没能确定哪组参模描述的是我们的宇宙，也没能知道为什么非得选出某组特别的值。

而且还有另外一些问题。比如，在最有可能的六维紧致化之后，我们得到了超对称理论。也许这看起来还不错；不过我们在第五章中已经谈到，我们并不是生活在一个超对称的世界中。超对称究竟是如何以及为什么在低能领域破缺？超弦理论仍然不能回答这个问题。与粒子质量有关的问题是：来自于弦的振动的最轻粒子在十维中是无质量粒子；紧致化过程之后，这些十维中的无质量粒子会生成四维中的无质量粒子。但是我们知道四维世界中只有两种无质量粒子：光子和胶子。其他粒子，比如电子之类的质量或许是来自于超对称的破缺过程；不过，上面已经提到，我们对此一无所知。

此外还有宇宙常数的问题。广义相对论方程中有一个描述真空总能量的常数，这就是宇宙常数。从天文学的观测中，我们可以知道宇宙常数是极其小的。弦论，作为引力的基本理论本应是能够预言这个常数究竟是多少的。根据超弦理论，如果超对称不破缺，宇宙常数就应该精确为零。不幸的是，超对称一定要破缺，因为我们日常生活于其中的这个世界并不具有超对称性。这样一来，弦论告诉我们的宇宙常数就会比实验上限大了  $10^{100}$  倍。这是全部科学中理论预言与实验之间最糟糕的分歧。

对另外一些人来说，超弦理论要求的时空维数“十”本身

就是个问题。超引力的研究表明，大自然允许的最大维度是十一。那么大自然为什么非得用十维而不用十一维呢？难道这不令人费解吗？

178

或许对超弦最强的反对是美学角度上的。一共有五个不同理论可以满足施加于超弦理论的诸多限制。我们所要追寻的是描述我们的世界的唯一的统一理论，五个显然太多了些。如果只有一个理论能够逃过这些限制，如果只有一个理论被挑选出来，那么我们或许会更加确信超弦正是独一无二的统一理论。不过事实并不是这样。

下面列举的是正式的五个自洽的超弦理论。

**I 型理论** 这是一个非定向开弦（不过因为两个端点可以连起来构成一个闭弦，所以该理论既可以描述开弦也可以描述闭弦）理论。如其他超弦理论一样，I 型超弦理论的低能近似是十维中的超引力理论。理论中有一个无质量的引力子以及很多规范场，这些规范场在很多方面都同我们真实世界中的光子、胶子、 $W^\pm$  玻色子与  $Z^0$  玻色子别无二致。也有一些费米子型的“物质”粒子，在规范场中也是带“荷”的（就像电磁场中的电子是带荷的，胶子场中的夸克也是带有荷的），荷在弦的端点上。所以，至少在十维上我们拥有一个同时包含引力与规范场的理论。I 型超弦理论的规范对称性是  $SO(32)$ ，这个规范群要比标准模型的  $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$  规范群大很多，所以在 I 型超弦理论有很多力和力的传递者。I 型超弦理论具有宇称破坏的特点（这点不错）并且具有  $N=1$  的超对称性（这点也不错）。总的来说，I 型超弦理论看起来倒挺有个统一理论的样子。对于参与第一次超弦革命的理论物理学家来



说，如果付出更多的时间和努力，我们在上面提到的那些问题完全是可以克服的。

**II A 型超弦理论** 这是一个具有  $N=2$  的超对称非定向闭弦理论。弦上顺时针方向的振动与逆时针方向的振动是一样的；也就是说，你不能区分左向运动和右向运动（它是一个非手征理论）。所以，尽管理论中包含了费米子，这个理论看起来注定是要失败的，因为真实世界中的费米子要么是左手性的要么是右手性的。II A 型超弦理论不能成为可能的物理学统一理论还在于另一个问题：没有规范对称性。尽管引力被纳入其中（所有的超弦理论中都有一个无质量的引力子），但是却不能给出标准模型所需要的规范对称性。

179

**II B 型超弦理论** 类似于IIA型超弦理论，只不过这个理论弦是定向的：左向运动和右向运动是可以区分的。这也意味着理论具有手征性，理论中可以存在没有对应右手伴的左手费米子。不过同 IIA 型超弦理论一样，规范力也没办法纳入其中。

**杂化  $SO(32)$  理论** 是仅有的两个数学上自洽的杂化弦论之一。具有定向性、手征性和  $N=1$  的超对称性，并且是一个闭弦理论。我们已经提到， $SO(32)$  规范群要比标准模型的  $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$  规范群大很多。紧致化的时候，十维理论中出现的手征性一下子就被消灭了。看起来这个理论还是不能被称为是能真实反映我们世界的理论。

**杂化  $E(8) \times E(8)$  超弦理论** 是另一个数学上自洽的杂化弦论。除规范群不同外，它差不多同  $SO(32)$  杂化弦论完全一样。不过规范群上的区别是很重要的；依靠这个理论，我们仍然有希望能真正理解标准模型所描述的物理世界。前面我们已

经提过，第一次超弦革命之后，人们对杂化  $E(8) \times E(8)$  超弦理论产生了很浓厚的兴趣，几乎就将其当成是统一理论。

表 2 中列出了五个超弦理论及其性质。

表 2 五种自洽的超弦理论

| 类型                         | 开弦/闭弦        | 定向 | $N$ | 分 析                                     |
|----------------------------|--------------|----|-----|-----------------------------------------|
| I                          | 开弦（亦可<br>闭弦） | 否  | 1   | 引力子，无快子<br>SO(32) 规范对称性                 |
| II A                       | 闭弦           | 否  | 2   | 引力子，无快子<br>无规范对称性                       |
| II B                       | 闭弦           | 是  | 2   | 引力子，无快子<br>无规范对称性                       |
| 杂化<br>SO(32)               | 闭弦           | 是  | 1   | 引力子，无快子<br>SO(32) 规范对称性                 |
| 杂化 $E(8) \times$<br>$E(8)$ | 闭弦           | 是  | 1   | 引力子，无快子<br>$E(8) \times E(8)$ 规范对<br>称性 |

五种理论有一些共同的性质。比如，这些理论都存在于十维时空；都包含引力子；并且五种理论都将超引力理论作为它们的低能有效理论。（有意思的是，这些理论只能导致四种不同的十维超引力理论： $E(8) \times E(8)$  杂化弦论，II A 型弦论以及 II B 型弦论分别对应于三种不同的超引力理论；而 SO(32) 杂化弦和 I 型弦论产生的是相同的超引力理论。事实上从一开始就有迹象表明 SO(32) 杂化弦和 I 型弦论有某种联系。）不过，五种理论看起来是毫无干系的。问题在于，从某种意义上讲，这五种理论差不多都带有基本理论的色彩。或许我们会更喜欢 SO(32) 杂化弦论些，因为毕竟它生成的低能理论看起来

180



更像是真实的低能物理。但是这种偏好并不能解释大自然为什么会选择它而舍弃其他四种可能性。我们希望的是大自然来挑选出哪一种理论才是基本理论；我们要找的就是那个统一理论。但现在大自然却给了我们五种彼此等效的理论。

即使将五种降为四种，实在还是太多了。

## 第八章 | M 的故事

没有我所深信不疑的这些理论的成功，  
就根本不会有什么观测存在。

查尔斯·达尔文 (Charles Darwin), 《查尔斯·达尔文的一生与书信》(*The Life and Letters of Charles Darwin*)

大约在第一次超弦革命 10 年后，物理学又迎来了第二次超弦革命。革命开始的第一枪由威滕在 1995 年 3 月 14 日打响，那天他在弦论团体的年度集会上做了一次演讲。基于几位物理学家一段时间以来的工作，威滕就如何看待弦论发起了一场观念上革命性的转变，新的观念或许比 10 年前格林和施瓦茨提出的还要重要。

在第二次革命中，物理学家们证明了五种不同的超弦理论如何在深层次上彼此关联。其实，五种理论不过是某一深层理论的不同显示形式，很多迹象表明这一深层理论就是我们所要追寻的那个独一无二的基本理论。这一深层理论称为 M 理论，其中 M 代表的可以是：形而上 (meta)，神秘 (mystery)，魔



幻 (magic)，母 (mother)，隔膜 (membrane)，矩阵 (matrix)，主 (master)，也可以是你喜欢的随便什么东西。不过遗憾的是，这一深层次的理论还不能明确的定义。其实，目前还没有人们可以写出并探索的此类“理论”；也没有一套成系统的原理，使得人们可以据其逻辑严谨形式缜密地发展出一套理论。现在这种情形与爱因斯坦发展广义相对论大相径庭：爱因斯坦有一个美妙的想法，那就是等价原理，根据这一原理，爱因斯坦顺畅自然地导出了他的理论。现在的物理学家要做的是到处搜寻更深层次理论的蛛丝马迹，然后将这些理论碎片整合到一起，从而得到更加严谨的理论。当物理学家们积累的理论越来越多时，或许他们就会发现指引整个理论的根本原理，也许物理学家们正在发展的 M 理论就相当于等价原理的作用。等到 M 理论获得成功之时，物理学家们便会更好地理解宇宙为什么按现在这个方式运作。不过坦率地讲，物理学家们离那一步还很遥远。

先不管令 M 理论深陷其中的迷雾泥潭，那显然是一个几年甚至十几年之内都会令人感兴趣的研究课题。当物理学家们最终成功地写出这一理论时，他们或许真的就找到了物理学的终极理论。不过那是故事的大结局；现在我们要说的是故事的开始，像以前一样，故事必然开始于对称性；不过这个故事还多一个古老的概念：**对偶性**。



## 电磁对偶性

阴阳原理……显明的对偶性表达着隐含统一性。

艾伦·外茨 (Alan Watts),

《道：水径》(Tao: The Watercourse Way)

对偶性是物理学中一个古老的概念。这个概念至少可以回溯到 19 世纪 60 年代，那时詹姆斯·克拉克·麦克斯韦发现了描述真空中电磁场规律的方程组。麦克斯韦方程组具有很多美妙的对称性，其中最令人感兴趣的就是电场与磁场互换下的对称性。如果你将电场换为磁场，并同时将磁场换为负的电场，你会发现麦克斯韦方程组不变。这种真空中的电磁场方程组在电场磁场互换下的不变性就是对偶性。

麦克斯韦方程组并不是仅仅只能用于描述真空中的电磁场，麦克斯韦方程组也可以用于描述静电荷，还可以运用于描述运动电荷或电流。可以证明，在这些一般情况下麦克斯韦方程也具有对偶性，但前提是同时引入电荷与磁荷，电流与磁流。

关于电荷，我们了解得很多；但是磁荷就比较神秘了。一般将磁荷称为磁单极子，但我们并没有在实验上发现它们。我们拿给小孩玩的条形磁铁总是有南北两极：条形磁铁具有偶极性。如果你将一块条形磁铁一分为二，你会发现每块条形磁铁仍有独立的南北极，唯一的区别是你从一块大的条形磁铁得到了两块小的条形磁铁。你可以一直这样地切下去，不过你永远

183



也不会得到磁单极子。最终你能得到的只能是质子、中子、电子；就是这些粒子组成了你的磁体。这些粒子都具有自旋，它们本身就是一个小的偶极磁体。显然，你并不能将一个电子切开，看看它是不是有磁单极子。

图 89 所示的是一个偶极体的场线。在一个磁铁周围放满铁屑，你就会直观地观察到磁力线。磁力线构成闭合回路，总是从磁铁北极出发，绕回到磁铁南极，再从磁铁南极经过磁铁内部回到磁铁北极。磁力线的这种性质与电场线截然不同。电场线发散或收敛于电荷（图 90）。不但将磁铁一切为二得不到磁单极子，就是在更复杂的高能加速器上的粒子碰撞实验中也不能产生磁单极子；人们从来都没有见过磁单极子。宇宙线实验或其他任何别的实验中也并没有看到磁单极子。看起来对偶对称性在大自然中并不存在，因为我们观测得到电荷，却不能观测到磁荷。

184

因而麦克斯韦发展他的电磁理论时，自然就将磁单极子从理论中去掉了——忽略磁单极子的存在并不会造成任何损失。麦克斯韦发现自己得到了一个很简洁的理论：其中讨论的只是电荷，而电荷的运动产生磁场。这样一来经典电磁理论中就没有磁单极子——于是脱胎于电磁理论的量子理论中也没有磁单极子。不过忽略了磁单极子的确使我们有所损失，损失了漂亮的对偶对称性。

### 磁单极子的回归

保罗·狄拉克认为人们或许可以找到某种办法将磁单极子引入到量子物理中，同时又不失去假定磁单极子不存在的理论

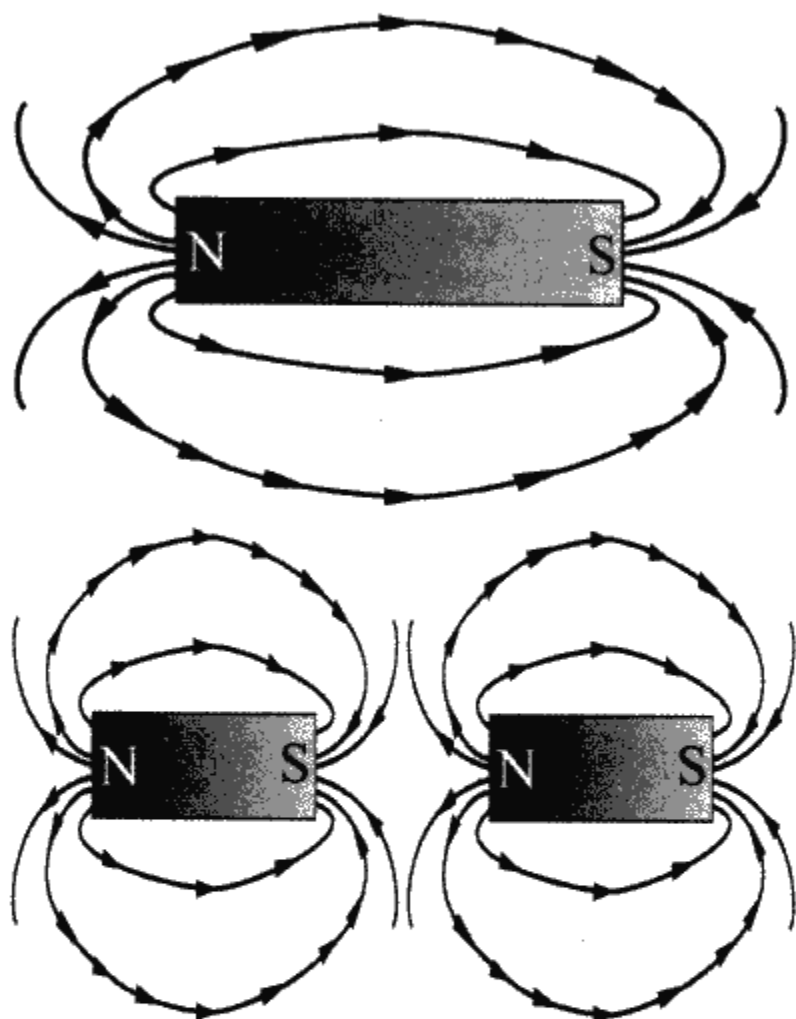


图 89 上方图的条形磁铁既有南极又有北极；磁场线成闭合回路。将一块磁铁一分为二后得到的将是两块磁铁，其中的任意一个仍然具有南极和北极，如下方图所示。即使不断切割磁体也不能得到孤立的磁单极子；当然也没有别的什么实验能够产生磁单极子。看起来磁单极子是不存在的

所取得的那些成就。1931 年，在一篇具有丰富想象力的论文中，保罗·狄拉克证明了他能成功地将磁单极子引入到理论中——但前提是基本磁荷的大小与基本电荷的大小有关。他证

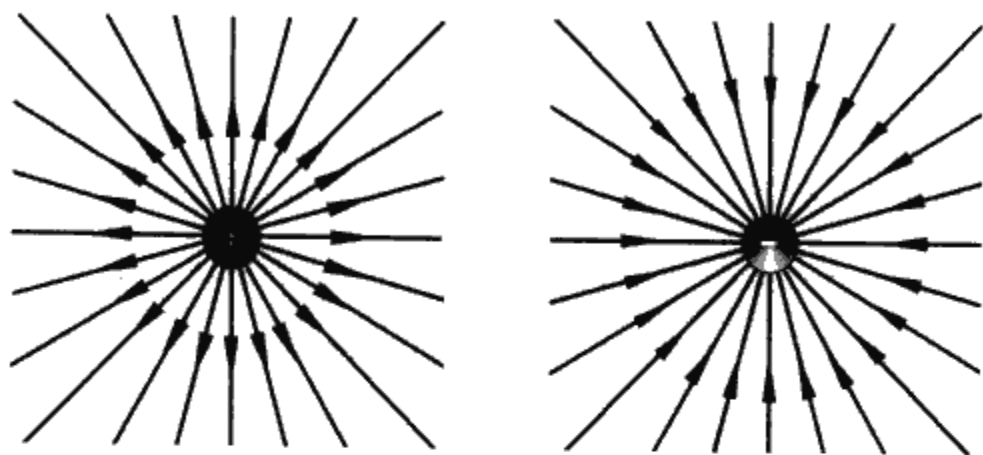


图 90 与磁极情形不同，电极——或者说电荷——可以孤立存在。

电场线要么出发于电荷，要么中止于电荷

明了，在适当选取的量子单位下，基本电荷与磁荷的乘积——也就是基本电荷与磁单极子荷的乘积——必须是整数。（如果两个数的乘积保持不变，则两个数就不能同时变大；如果这两个数中一个变大，则另一个就必须变小。因此，在狄拉克的理论中，要是磁荷取很大的值，则电荷必须取很小的值，反之亦然。当然，我们已经知道了基本电荷的值：正是电子电荷的大小。这个值确定了理论中数的大小。在恰当选取的单位下，基本磁荷要比基本电荷大 68.5 倍。）

185

我们所看到的所有电荷都是电子电荷的整数倍，这一点一直以来就是一件很神秘的事情（虽然夸克具有分数电荷，不过我们从来也没有见过孤立夸克。我们能见到的夸克组合向来都是正好具有整数电荷的）。只要磁单极子存在，保罗·狄拉克就找到了这个神秘问题的答案。他的理论证明，只要宇宙中存在一个磁单极子，那么所有的电荷就只能是磁荷倒数的整数

倍，换句话说就是电荷被量子化。

尽管狄拉克的理论具有毋庸置疑的优美，但在其诞生之后的 40 年间，物理学家们几乎没做任何磁单极子方面的研究。1974 年，乌德勒支大学的赫拉尔杜斯·特霍夫特与莫斯科朗道研究所的亚历山大·玻利雅科夫（Alexander Polyakov）各自独立证明了在很普遍范围内的大统一理论中都将不可避免地存在磁单极子。至此，磁单极子的研究才开始有所进展。

特霍夫特与玻利雅科夫证明，大统一理论的规范对称性破缺的时候，基本的场可以变得“扭曲”。场中会出现“缺陷”。场方程的解允许有束缚扭曲的能量堆积。在某些位形中这些能量堆积同我们一直所说的量子粒子很类似，同样具有质量、自旋、电荷等，只不过并不像夸克、轻子、规范玻色子等一样是基本场的量子（它们与你脑海中的量子粒子形象并不相符。弥漫于整个空间并且具有很重的质量，有可能是质子质量的  $10^{18}$  倍）。特霍夫特与玻利雅科夫发现的这些基本场延展扭曲的位形正是磁单极子：我们所能看见的只是直接的磁场，而不是那些场能量的堆积（类似地，当我们远离电荷的时候，看到的也只是成直接辐射状的电场）。

特霍夫特与玻利雅科夫所探索的那类场的位形称为孤波，孤波现象几十年来就是一个谜题。1834 年 8 月，约翰·司科特·拉塞尔（John Scott Russell）在爱丁堡附近的联合大运河（Union Canal）看到了“孤立波”，这是人们首先注意到孤波现象（图 91）。孤立波同司科特·拉塞尔在海滩上看过的任何波浪都不一样。这个波是“圆形，光滑，边界清晰的水堆”，以每小时 8 千米的时速前进了几千米，其间，速度和形状未发



生任何改变。今天，我们还知道其他一些孤立波的例子。其中最著名的例子当属英格兰塞汶河涌潮（Severn Bore）的孤立波（图 92），它可以传播大约 40 千米，能达到 2 米的高度。曾有人在英格兰乡下的潮尖冲浪达 10 千米之远。



图 91 1834 年 8 月，约翰·司科特·拉塞尔在联合大运河观察到一个有趣的现象：一条由两匹马拉着前行的船突然停下来的时候，会出现一个弓形的波，而这个波会继续前行数千米。这就是孤波。1995 年，一些志愿者重现了约翰·司科特·拉塞尔观察到的著名孤波

186

我们将孤波定义为在连续介质中能够长距离传播而保持形状或振幅不变的局域波，而且即使两个或更多个这样的波碰撞，彼此也保持不变。特霍夫特与玻利雅科夫理论中能量堆积的定义同样如上。



图 92 如果河道出口的形狀恰到好处，再遇上合适的潮汐条件就会形成怒潮——“孤波”。形成怒潮的条件并不容易满足，因此全世界只有大约 60 个涌潮。图中所示的是位于英国的塞汶河涌潮，流传久远的例子之一；这一涌潮的有关记录可以追溯到 6 世纪

## 孤波技术

除了场论，孤波在科学和技术的很多分支领域中都是非常重要的。每秒钟，数以十亿计的孤波在我们网络世界的光纤中传播。从高温超导到 DNA 分子中能量传输的模拟，孤波在科技领域有各种各样的应用。

谈了以上这些，我们必然会问，是什么使得特霍夫特与玻利雅科夫的孤波可以保持不变？为什么不会散成其组分场？司科特·拉塞尔在联合大运河中看到的孤立波最终不也消失不见了吗？这里涉及图 93 所示的位形，其中左图所示的场位形，

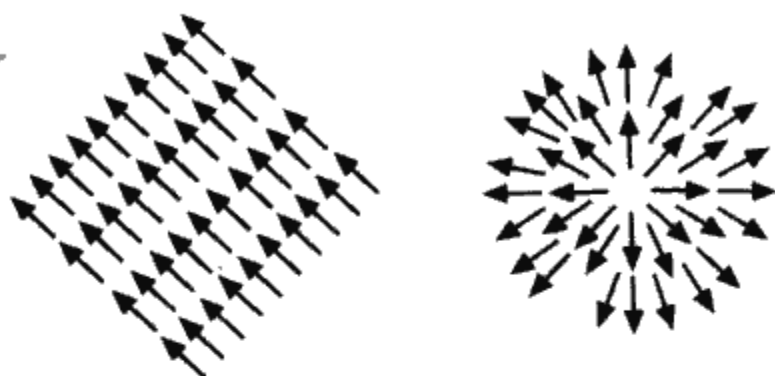


图 93 左图中所有点的场线都指向同一方向。场线的位形对应着真空，或者说最低能量态。右图中，所有的箭头都向外发散。这种位形具有更多的能量，可以衰变的真空位形。但是，右图并不能平滑地转变到左图；因此，尽管右图的位形具有更高的能量，但却处于稳定状态。拓扑上的考虑使得右边这样的刺猬形不能衰变到真空位形

所有的箭头都指向同一方向，对应的是真空——最低能量态。

187 特霍夫特（图 94）与玻利雅科夫探讨了右图中的场位形，其中所有的箭头都呈向外放射状；这种位形一般被称为刺猬形（因为它看起来就像一只蜷成一团的刺猬身上那些刺）。追问为什么孤波不会消散等同于追问为什么刺猬形最终没有变成真空形。研究这类问题需要用到拓扑学。

188 拓扑学研究的是连续变换下的对象（连续变换指的是用压扁、拉伸等任何你愿意的方式改变研究对象的外形；只要不在研究对象上穿洞或将研究对象粘合起来就行）。所以，一个精确的圆球表面与一个土豆表面在拓扑学的意义上是完全一样的：你可以通过连续变换将一个精确的球形变成土豆、雪茄、盒子或多面体。一个油炸面包圈和一个咖啡杯也是拓扑等价的：你完全可以将有一个洞的面包圈变成同样有一个洞的咖啡



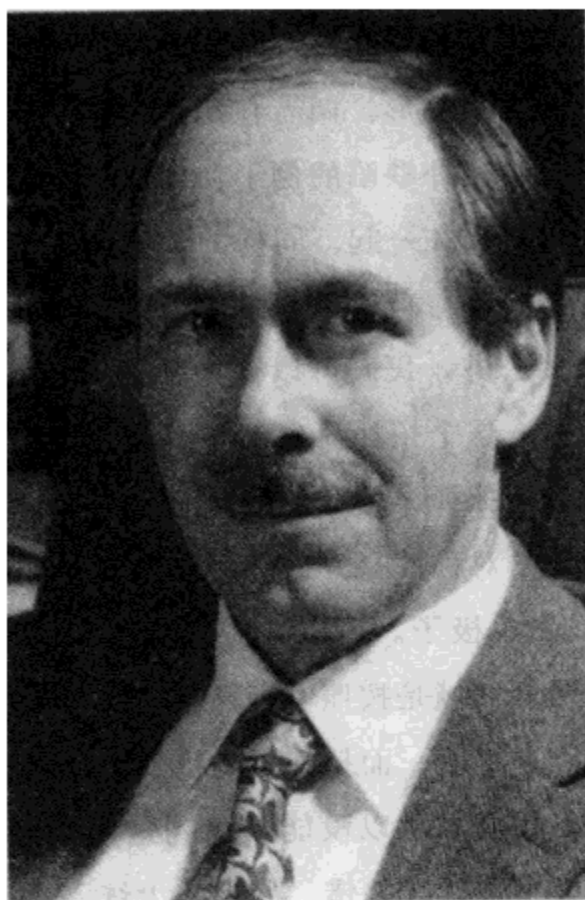


图 94 荷兰物理学家赫拉尔杜斯·特霍夫特是 1999 年诺贝尔物理学奖获得者，同时获奖的还有他的合作者马丁·韦尔特曼。他们的获奖原因是阐明了电弱相互作用的量子结构。特霍夫特在理论物理的其他方面也作出过很多重要贡献，其中包括提出了大统一理论会导致磁单极子的存在

杯。但是球和油炸面包圈却不是拓扑等价的：油炸面包圈上有一个洞而球上则没有。霍默·辛普森（Homer Simpson）曾开玩笑说：“还有什么油炸面包圈搞不定的吗？”没错，油炸面包圈不能变成一个球，要想把一个油炸面包圈变成一个球，你



首先要做的是将它拽断，然后拉长，再缝在一起，油炸面包圈便成了球形。不过拓扑学是不允许干这样的事的。同样的理由也适用于刺猬与真空位形。两者在拓扑学意义上是不同的。刺猬形实际上是一个拓扑缺陷的例子。要使孤波消散，也需要先将其切断，然后再排在一起。同样的，这也是拓扑学所不允许的。因此，特霍夫特与玻利雅科夫孤波实际上是一个拓扑孤波。从某种意义上讲，我们可以认为孤波具有拓扑“荷”，如同电荷守恒一样，这个拓扑荷也是守恒的。只有当与一个拓扑反孤波相遇时，拓扑孤波才会消散。

大统一理论的对称性自发破缺时会自动生成大量的特霍夫特-玻利雅科夫磁单极子。所以，假如标准模型真像我们认为的那样，在高能量区域是按照 GUT 统一的，那么早期宇宙就会产生大量的磁单极子。而拓扑学告诉我们这些磁单极子直到今天仍然存在。我们之所以没能观测到这些大爆炸的剩余物，或许是因为哪里出了什么差错。而且，大统一理论将导致磁单极子的存在，这本身还意味着早期宇宙可能经历过一段急速扩张的时期，这段时期就是所谓的暴涨（见第五章补充性文字“大统一及暴涨”）。这样的暴涨扩张会迅速地稀释磁单极子的密度——能观测到的宇宙中甚至可能只有一个磁单极子。如果暴涨理论真是正确的话，那么我们没能观测到磁单极子就毫不稀奇了。这样想来，虽然没能观测到磁单极子的存在，磁单极子的理论还是值得我们去研究的；而且，这样的理论还具有电场与磁场之间的对偶对称性。

1974 年，特霍夫特与加州大学伯克利分校的斯坦利·曼德斯坦姆（Stanley Mandelstam）分别独立提出一种电磁对偶

性，这种电磁对偶性有可能解释 QCD 理论的关键疑难：夸克禁闭。

我们知道，标准 QCD 理论中，夸克可以形成介子（正反夸克对）或重子（夸克三重态）等束缚态。尽管物理学家并不能严格证明禁闭的存在，但实验和数值模拟都表明正反夸克对中的能量的确是随着夸克之间距离的增加而线性增加的。夸克与反夸克之间的距离增倍，则能量倍增；距离增加 4 倍，则能量也随之翻了 4 番。正是因为存在着这样的机制，若想将夸克之间的距离拉到足够大以便获得孤立的自由夸克，所需要的能量将大到我们永远也不能提供。

夸克之间能量的这种增长方式有一个很简单的解释：夸克之间可以形成一个“流管”。流管是香烟那种细长状，色力的场线就包含在其中，看起来好像夸克之间都有一根皮筋连着一根（见图 95 左边）。正是因为这个流管中的能量先行增长，所以人们不能将夸克与反夸克分开无限远以便研究孤立夸克的性质，也就是说，夸克只能被禁闭在强子之中。



图 95 当我们试图将一对正反夸克分开的时候，这对正反夸克之间的色力线被拉伸，夸克之间形成一个流管。当我们向超导体中插入一对正反磁单极子时也会遇到类似的情况；磁场线禁闭于流管之中

对于理论物理学家来说，最困难的一点在于上面的物理图像发生在强耦合区域，通常所用的研究工具——微扰论这个时候不起作用。物理学家们只有依靠计算机模拟才能尝试着研究



禁闭；乍看之下似乎不可能得到理论的解析结果。好在还有另外一种很像夸克禁闭的物理现象，只不过那种现象有更加扎实的根基，也更易于接受；这就是超导体中磁单极子之间磁流管的产生（见补充性文字“超导体中的磁单极子”）。

事实上，两者非常类似。夸克带有色荷，禁闭于真空；磁单极子具有磁荷，禁闭于超导体。不要忘了 QCD 中的色荷相当于电磁理论中的电荷。既然超导体中电流产生磁场，那么 QCD 真空或许会也带来相同的关系！特霍夫特的思想正是对偶性一个很有意义的应用：定性地解释了夸克禁闭。不过，20 世纪 70 年代的时候，不管是特霍夫特还是别的什么人没有找到发展这一思想的工具。

70 年代，对偶性与磁单极子思想取得了很多进展。1977 年，CERN 的克劳斯·曼坦宁（Claus Montonen）与戴维·奥利弗（David Olive）讨论了一种超对称量子理论，该理论的特别之处在于其中包含了磁单极子。两人推测理论中会有一种电荷和磁荷之间的精确对称性。将“电”与“磁”互换，整个理论不发生任何变化。两种描述彼此对偶。研究过磁单极子后再看电磁对偶性（如果真的存在的话），我们或许会感到很惊奇。通常我们认为带有电荷的物质（夸克、电子等）都是很轻的类点基本粒子；而带有磁荷的物质（磁单极子）都是很重且延展的广义孤波。但是从对偶性的观点来看，磁单极子是基本粒子，而夸克和电子是孤波式的能量堆。换句话说，所有的带电基本粒子等价于具有对应荷的孤波。电荷与磁荷彼此交换使得其他的一切也都彼此交换。比如，理论中的耦合常数取决于电荷的大小。所以，在曼坦宁-奥利弗理论中，将取决于某个荷

的耦合常数与取决于对应荷的耦合常数彼此交换，物理理论不会发生变化。如果耦合常数很小（处于弱耦合区域），对应的耦合常数就应该很大（处于强耦合区域）。这样我们就可以推断理论的强耦合区域与弱耦合区域之间存在对偶性。

## 超导体中的磁单极子

191

1933 年的柏林，沃尔塞·迈斯纳（Walther Meissner）和他的研究生罗伯特·奥森菲尔德（Robert Ochsenfeld）发现超导体会将磁流排于其外。这就是所谓的迈斯纳效应（图 96）。

磁单极子是磁流的起源，要是我们将一对间距足够大的正反磁单极子插入到超导体中会发生什么现象呢？是什么使得超导体将磁流排于其外？（实际中我们当然不能使用磁单极子。但通过恰当地选择外磁场，我们是可以复制这个理想实验的。）答案是系统形成了具有最低能量的位形：正反磁单极子对之间产生了非超导性磁管，磁流被禁闭于磁管之中，见图 95 右侧。[俄罗斯物理学家阿列克谢·阿布里科索夫（Aleksei Abrikosov）和列夫·高科夫（Lev Gorkov）首先描述了这种现象，因此这个管被称为阿布里科索夫-高科夫流管。由于在超导物理方面的先驱性工作，阿布里科索夫获得了 2003 年诺贝尔物理学奖。] 每单位长度的阿布里科索夫-高科夫流管具有确定的能量。所以，如果将正反磁单极子对之间的距离翻番，能量就会加倍；同样，距离翻两番，能量变四倍；如此等等。

曼坦宁和奥利弗对大统一理论都很有兴趣。如果这样的理

192

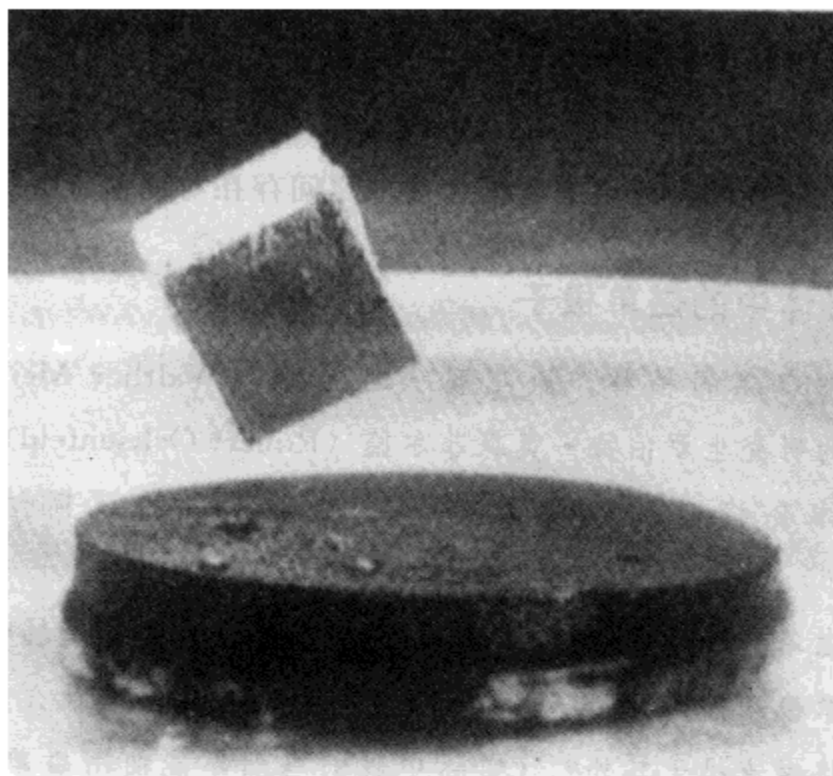


图 96 迈斯纳效应的传统示例。将一块磁体（上边的物体）放到超导体（下边的圆盘）附近，磁体会受到一个阻力，因而悬浮在空中。这一性质有很多实际应用——从高速磁悬浮列车到 MRI 扫描仪（磁共振成像的缩写为 MRI）。今天，MRI 技术已经成为医学上检查人体几乎所有器官的可行方案了

论真的具有电磁对偶性，那么就有了另一种研究理论微扰方面的方法。比如你在理论的强耦合区域遇到一些麻烦，微扰论不起作用，看起来进展不下去了，那么你就可以利用对偶性理论；相关问题的对偶问题相当于是在弱耦合区域，于是你就又可以使用你所熟悉的微扰方法来解决问题了。因为理论是对偶的，所以不管你使用的是哪一个理论，最后的结果一定是一样

的。在某个理论中解决不了的问题，在其对偶理论中就可以解决，反之亦然。这个技巧多么美妙呀！

不过，曼坦宁和奥利弗不能证明他们的理论中的确存在电磁对偶性。原因很明显：他们提出对偶性交换弱耦合常数与强耦合常数，但是我们只明白弱耦合区域的量子场论。一个耦合常数和它的对应者不可能同时很小，两者中必有一个不在我们的控制范围之内。我们仍然无法触及强耦合区域，所以我们不知道对偶性原理是否成立。因为无法证明曼坦宁和奥利弗的猜想，整个对偶性方面的研究一直停滞不前。

这种局面一直持续到 90 年代，物理学家们发现了一些理论中存在电磁对偶性的证据。艾索科·森（Ashoke Sen，图 97）证明了超对称要求有某种同时具有电荷与磁荷的孤波存在，这正是曼坦宁和奥利弗猜测却不能证明的事。这一发现启发了普林斯顿大学的内森·塞伯格（Nathan Seiberg，图 98），他认真地考虑了超对称场论中对偶性的概念。结果表明，对于一个超对称性理论，人们可以推出一些强耦合区域的信息。现在人们认识到，超对称正是解开强耦合区域之谜的关键。例如，存在一种量子态，称为 BPS 态 [根据 70 年代中期首先探索其性质的三位物理学家的名字命名：莫斯科朗道研究所的尤金·博格莫涅（Eugene Bogomolny）；耶鲁大学的曼诺·普拉萨德（Manoj Prasad）以及查尔斯·索莫菲尔德（Charles Sommerfield）]。对称性保证：对于给定的荷，BPS 态可以具有最小可能的能量；而超对称性保证：不管理论中的耦合常数是多少，BPS 态都可以具有最小可能的能量。所以我们可以先计算出弱耦合常数区域的 BPS 态，然后，由于有超对称的

193



“保护”，我们可以安全地将结果外推到强耦合区域。这样我们就可以了解理论非微扰方面的一些信息了。不过，BPS 态的粒子谱决不是强耦合区域的完整粒子谱。再加上量子力学所给出的一些其他的信息，人们就可以识别出强耦合理论中一些与众不同的模式——理论的一些“指纹”。根据这些指纹，人们就可以推出对偶理论。

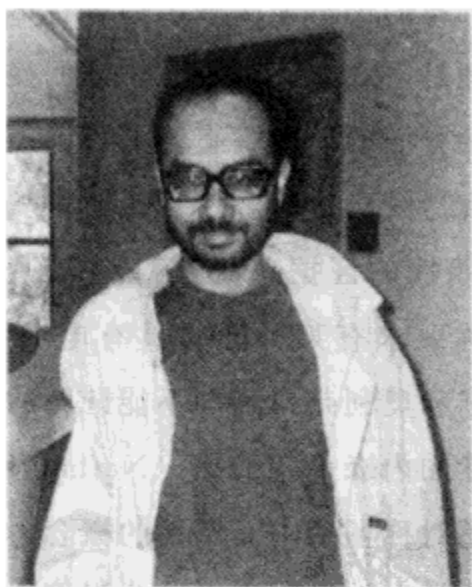


图 97 艾索科·森是印度阿拉哈巴德的哈里什-钱德拉研究所 (Harish-Chandra Research Institute, HRI) 的一位物理学教授。他对弦论作出过很多重要贡献

根据这种逻辑，塞伯格得出了一些对偶性的例子，他的工作作为超对称规范理论具有电磁对偶性这一想法提供了不可辩驳的证据。或许严格说来，这些只能算是旁证；但是，在大部分法庭上，这样的证据已足以定罪了。现在人们几乎毫不怀疑，有可能用来描述大统一能量区域的物理理论——超对称规范理



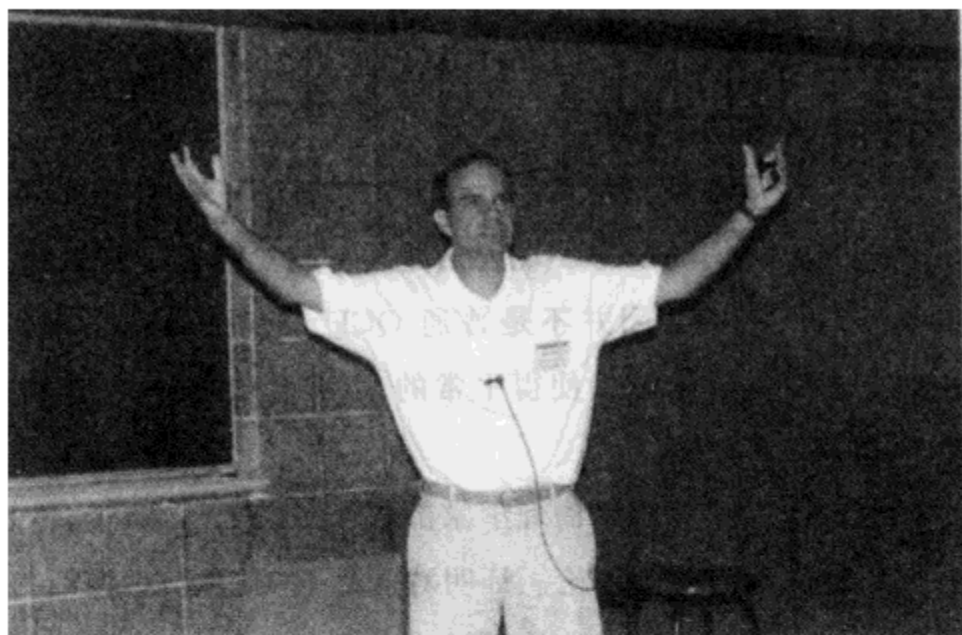


图 98 内森·塞伯格是普林斯顿高等研究所的一位数学物理教授。

他曾与爱德华·威滕合作过很多篇论文

论——具有对偶性。

1994 年，塞伯格和威滕合作发表了一篇论文，两人在文中讨论了一个具有  $N=2$  超对称性和  $SU(2)$  规范对称性的四维理论。在那之前，人们从这样一种理论中所能指望得到的最好结果就是一系列微扰近似。但是利用极其强大的对偶性，塞伯格和威滕找到了这个理论的精确解。结果很快被推广到一般的  $SU(N)$  规范群理论。这是人们首次找到这样理论的精确解。事实上，就在这篇论文发表之前的几个月，很多物理学家还在怀疑四维理论是否永远都不能够得到这样的精确解。塞伯格和威滕的关键发现之一是夸克禁闭的定量描述。这既不是随意的讨论，也不是由计算机模拟出来的数值证据，而是解析表



达式。多亏了塞伯格和威滕，人们得以知道  $N=2$  的超对称性 QCD 理论确实具有禁闭（其禁闭机制正是 70 年代由特霍夫特提出来的磁单极子凝聚）。

当然，超对称性 QCD 并不是标准模型 QCD。而且这里需要强调的是：我们还没有发现大自然具有超对称性。所以塞伯格和威滕所证明的禁闭并不是普通 QCD 禁闭的证明。不过，塞伯格和威滕的方法至少使得平常的 QCD 理论中的夸克禁闭看起来更像是真的了。

突然之间，数学家和物理学家都着迷于对偶性了；毫不奇怪，他们再次转向超弦理论。证明对偶性的关键是超对称；而超弦理论只有在超对称成立的时候才有意义。那么，人们这次能否在超弦中找到对偶性呢？

## 对偶性与数学

对于那些研究平滑四维流形拓扑的纯数学家来说，塞伯格-威滕方法无异于一件真正的礼物。利用对偶性，数学家们可以证明很久以前根本难以处理的结果。尽管物理学家们一再宣称威滕也是物理学家中的一员，数学家们仍然十分乐意使用由他的工作所滋生的累累硕果。

1994 年，威滕因在弦理论、超对称性和数学方面的贡献而获得菲尔兹奖。

## 弦论中的对偶性

弦索不调，怎能有和谐的音乐？

威廉·莎士比亚 (William Shakespeare),  
《亨利六世》(第二部) (*Henry VI, Part 2*)

其实，对偶性也是解开很多超弦谜题的关键所在。威滕在弦论 95 届大会上所做的报告肯定了几位弦论物理学家在对偶性方面的工作，向世界大致展现了一幅令人惊奇但却美妙异常的深层理论图景。

### S 对偶性

激发了威滕灵感的两位物理学家是伦敦的玛丽皇后大学的克利斯托夫·赫尔 (Christopher Hull) 和剑桥大学的保罗·唐森 (Paul Townsend, 图 99)。

赫尔和唐森关注的是 II B 型弦论，他们探索了在各种变换下伸缩子场的情况。两人发现，将一个伸缩子场（比如  $\phi$ ）换成相同大小但却反号的场（ $-\phi$ ）时理论不变。也就是说，交换  $\phi$  与  $-\phi$ ，你所得到的的是同一个理论。两者之间具有对偶性。还记得吗？弦论的耦合常数可以与伸缩子场的尺度按某种特殊但却明确定义的方式联系起来。当我们将正的伸缩子场替换成负的伸缩子场的时候，相当于将大的耦合常数替换为小的耦合常数。这种理论中强耦合区域和弱耦合区域之间的对称性称为 S 对偶（我们可以将 S 对偶性视作“强-弱耦合常数对偶”）。

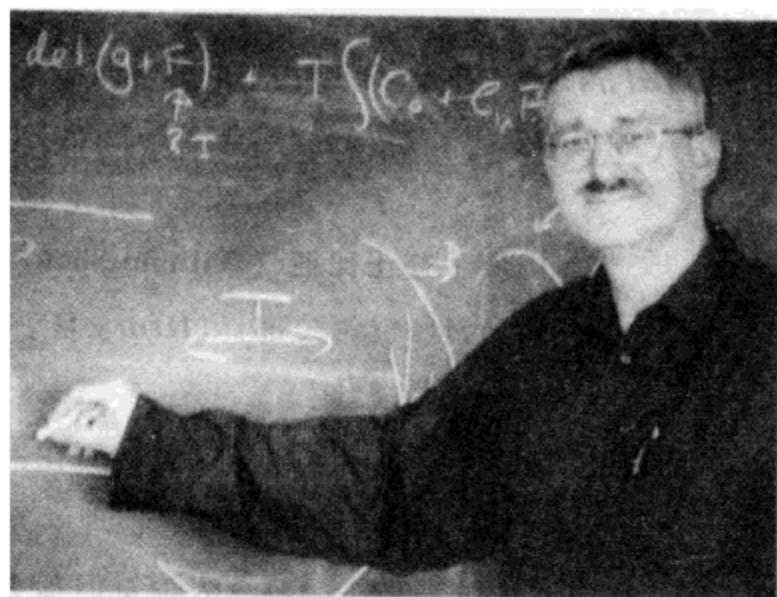


图 99 保罗·唐森是剑桥大学的理论物理教授。他是“膜”的发起者之一，并且最早认识到弦论中对偶性的重要

196

II B 型弦论是自对偶的。这是一个好消息：理论的弱耦合区域很容易处理；因此通过研究 II B 型弦理论中的弱耦合区域，我们就会了解理论中的强耦合区域，于是，理论中的各个能量区域我们都可以处理了。

认识到这一点后，威滕将注意力转向 I 型弦论以及 SO(32) 杂化弦论。既然这两个理论都将 SO(32) 群作为规范群，那么有没有可能通过对偶性将两者联系起来呢？威滕很快发现如果将 I 型弦论的正伸缩子场与 SO(32) 杂化弦论的负伸缩子场交换，理论仍然保持不变。所以威滕猜测 I 型弦论与 SO(32) 杂化弦论可以通过 S 对偶联系起来。一个理论中的耦合常数变大时，可以转而考虑另一个理论。像这样的对偶性具有神奇的魔力，乍看之下彼此完全无关的两个理论在某种意义

上是同一个理论。

利用 S 对偶，我们不仅可以了解 I 型弦论、II B 型弦论以及  $SO(32)$  杂化弦论的强耦合区域；还可以将超弦理论的种类由五种降为四种：I 型弦论与  $SO(32)$  杂化弦论本质上没有区别。

而且，它还有其他一些妙处。

### T 对偶性

早在 1984 年，吉川圭二 (Keiji Kikkawa) 与山崎正树 (Masami Yamasaki) 就曾讨论过弱耦合区域中弦论对偶的可能性。当时吉川与山崎正在研究可以使用微扰论的弱耦合区域，正是这个机缘巧合使他们早在 S 对偶性成立之前就发现了一种对偶性。人们后来发现，吉川与山崎的对偶性在强耦合区域通常也能成立。这种对偶性现在一般称为 T 对偶，意为“目标空间对偶性” (target-space duality)。

弦论的目标空间就是我们生活的这个空间。通常意义上的弦论空间指的是平坦并且在每一个维度上都是无限大的十维时空。不过我们也可以将理论置于某个具有一些蜷曲维度的特殊空间中。现在我们先来看一下最简单的情形。

考虑一个十维时空 (九维空间加一维时间)，假定其中某一个维度紧致成很小的圆环。这看起来很像我们早先提到的卡鲁扎-克莱因时空。如果圆环的半径为  $R$ ，类点粒子绕圆环一周运行  $2\pi R$ 。根据量子力学原理，粒子的能动量被量子化。粒子能量正比于  $n/R$ ，其中  $n$  为整数；这样我们得到了无限数目的粒子组，其能量分别正比于  $1/R$ 、 $2/R$ 、 $3/R$  等。同样地，



对于绕着紧致圆环运动的弦也有相同的情况：弦的动量被量子化。于是就像类点粒子一样，绕紧致圆环运动的弦就会产生不同动量模式。对于点粒子来说，走到这一步就是故事的结局了；不过如果我们考虑的是闭弦，则情况要复杂得多。对于闭弦，除了绕圆环运动，我们还可以将弦绕在圆环上。弦在圆环上的缠绕次数称为缠绕数。因为我们考虑的是闭弦，所以缠绕数只能是整数（也就是说缠绕数是量子化的）。弦绕圆环一次，缠绕数就是 1；绕圆环两次，缠绕数就是 2，以此类推。而弦的位形，则会产生缠绕模式；这是考虑类点粒子时所不需要探讨的问题。我们将绕在环上的弦缠绕得越紧，弦中的能量越大；换言之，缠绕模式对弦的能量有所贡献。准确说，如果圆环维度上缠绕了  $m$  圈的弦，那么能量就正比于  $m \times R$ ；这样我们就得到了无穷个能量分别正比于  $R$ 、 $2R$ 、 $3R$  等的激发弦（图 100）。

我们来将动量模式（能量为  $n/R$ ）和缠绕模式（能量为  $m \times R$ ）做一下交换；同时将圆环半径与  $L_{\text{string}}^2/R$  做交换，其中  $L_{\text{string}}^2$  是基本的弦长度。（如果  $R$  比  $L_{\text{string}}^2$  小很多，则  $L_{\text{string}}^2/R$  为很长的距离，这样我们就实现了短距离和长距离的交换。）如果交换前后的物理不发生变化，则我们称这两个理论是 T 对偶的。

分析表明，II A 型弦论与 II B 型弦论是 T 对偶的。也就是说，假如我们将这两个理论紧致化在一个圆环上，然后将弦的动量模式与缠绕模式交换，并同时将一个尺度标度换为一个大尺度标度，则会发现 II A 型弦论换成了 II B 型弦论（反之亦然）。同样的，T 对偶也将杂化  $SO(32)$  理论与杂化  $E(8) \times$

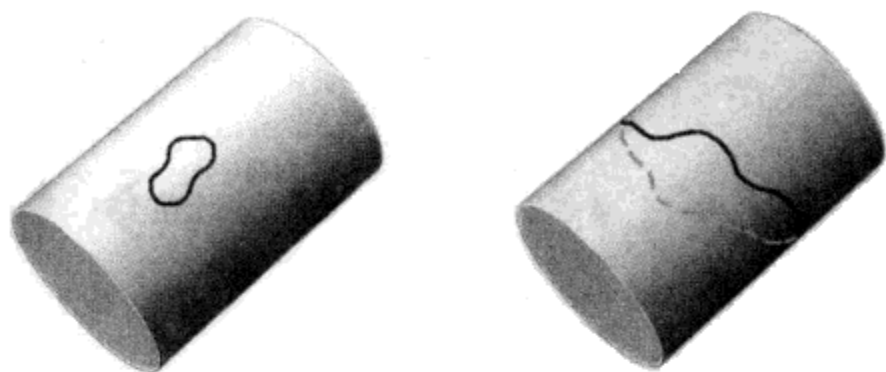


图 100 如左图所示，弦可以在紧致环上随意运动，这种情况下的环类似于点粒子；与之对应的是弦的动量模式。弦也可以绕着紧致环运动（右图），而这是一个点粒子做不到的；与之对应的是弦的缠绕模式：弦绕在环上的次数越多，弦所具有的能量就越大

$E(8)$  理论联系起来。这样两种 II 型超弦理论与两种杂化弦论就彼此紧密关联起来。最早的时候我们有五种不同的弦论；利用 T 对偶，独立的弦论就只有三种了。而根据 S 对偶，I 型弦论是杂化  $SO(32)$  理论的 S 对偶。所以不同的弦论仅仅有两种。很有可能你会认为对偶对称性可以将所有的超弦理论联系起来，从而只有一种弦论。

T 对偶与人的直觉背道而驰——本质上，T 对偶相当于告诉我们很大的尺度与很小的尺度是不能区分的（图 101）——所以很有必要细细地了解一下它。不管怎样，我们当然知道一个紧致圆环到底大还是小：难道我们不能量出圆环的周长从而知道环的半径究竟是多少吗？

我们的宇宙大约是 137 亿光年，三个空间维度很有可能（当然也可能不是）弯曲到与自身相连的地步。换言之，我们推测这三个空间维度很有可能都是半径为 137 亿光年的圆环。

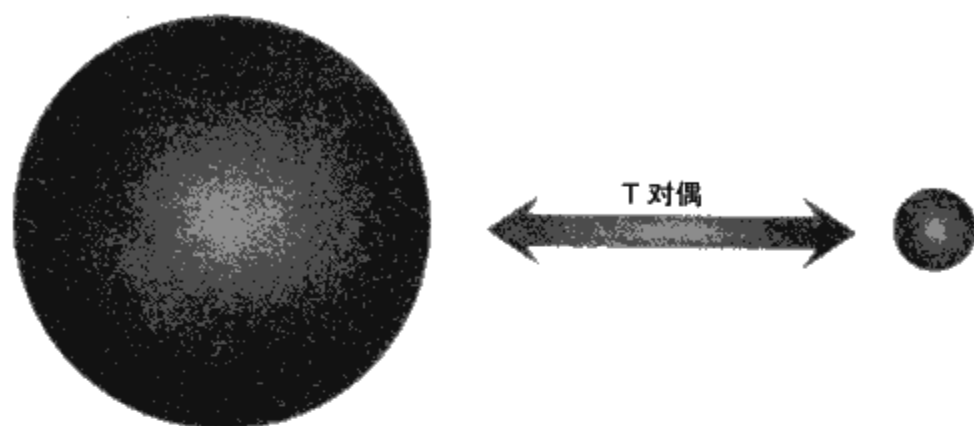


图 101 T 对偶可以反转紧致半径。大紧致半径的物理与小紧致半径的物理在 T 对偶下不可区分

如果正确描述这个宇宙的物理理论真的是 T 对偶弦论的话，那么我们在这个大的宇宙中观测到的物理与在三个半径仅为  $10^{-96}$  米的小圆环宇宙中观测到的物理将是一模一样。随着我们的大宇宙不断地扩张，那个小宇宙将不断变小。当然，这样的想法太过疯狂！除了我们居住的星球看到的星星甚至星系，还有半径只有  $10^{-96}$  米的宇宙——就连比起普朗克长度来都算是一块小碎片——甚至连一个电子都不能盛装。而且，不是说普朗克长度是在我们的讨论中能够有意义的最小距离吗？那么我们还谈这些比普朗克长度还小的不可思议的长度有什么意义呢？难道所有这些都不能证明 T 对偶的概念是错的吗？

应该说并不是不能，第 282 页补充性文字“利用弦测距离”将会解释这些问题。

## T 对偶与拓扑

弦论中，时空的拓扑结构也可能存在一些不清不楚的问



题。在探讨 T 对偶的时候，我们采用的是简单的一维蜷曲维度；T 对偶改变的只是圆环的尺寸，而其拓扑结构并未发生变化。布赖恩·格林（Brian Green）与罗森·普莱舍尔（Ronen Plesser）证明：对于卡拉比-丘流形上的紧致化来说，不能指出紧致化到底是在一对**镜像流形**上的哪一个上。这意味着卡拉比-丘流形具有镜像对称性（这里指的镜像流形并不真是一个流形在镜中的形象；一对镜像流形可以有完全不同的外观和性质）。紧致在这两个根本不同的流形上的弦论物理是一样的。

镜像对称性的性质不仅对物理学家很重要，对数学家来说也同样如此。人们发现有些在某个流形上很难解决的问题，换到镜像流形时则很容易解决。利用弦论中发展起来的技术，数学家们已经可以解决一些以前他们连想都不敢想的问题。这里，我们再次看到了弦论与数学之间的密切联系。目前，人们还不能利用实验（而实验一直是科学进展中最常用到的检验真理方法）对弦论证伪；但是很多时候，数学却能够很好地充当验证弦论中某些想法的试验场。至少到目前为止，数学家们还没发现错误。

点粒子物理中是没有 T 对偶的，因为点并不能像弦那样将自己缠绕在圆环上。缠绕在圆环上是弦的事。如果大自然真的是按弦论运作，那么我们会得到下面一些基本结论。

首先，我们需要推广海森堡的不确定原理。根据通常的海森堡不确定原理公式，我们所能探索的空间长度取决于我们所能提供的能量大小；只要能给出足够高的能量，我们就能够探索任意小的空间。但是，如果我们打算探索的基本实体是弦的

201



话，情况就会有所不同，因为我们所能探索的空间大小取决于弦的尺寸。但是当我们得到弦的能量尺度时，弦就会扩张。最终我们所探寻到的并不是短距离，而是大的弦的传播。

更有趣的是，我们通常的时空几何概念最终会破产，并且应该用弦几何代替。表面上显而易见的几何概念，比如大尺度和小尺度之间的区别，会变得含混不清。

200

## 利用弦测距离

有了准绳我们才能够测量任意的距离。比如，GPS 利用光作准绳：通过测量一束光脉冲从卫星到某一已知距离的时间，我们就可以知道该地距离卫星的远近。不同的研究领域需要不同的准绳。当我们要测的是弦论中紧致圆环的周长时，我们能用的准绳就是弦。不过，在弦论中我们有两种不同的准绳可以使用：我们既可以用动量模式也可以用缠绕模式作为准绳。

1988 年，布朗大学的罗伯特·布兰登博格（Robert Brandenberg）和哈佛大学的卡姆兰·瓦法（Cumrun Vafa）证明人们利用两种不同的方法测得的距离是不同的。假设某个弦论是紧致化在半径为  $R$  的圆环上。（我们必须首先定义长度，然后才能谈论长度  $R$  的概念。我们采用的究竟是哪一种弦的位形并不重要，关键是一旦选定，在其后的讨论中就要一直使用相同的方案。我们不妨就选取动量模式来进行我们的讨论。）回想一下动量模式，它允许沿着环自由传播；因为我们选用的是动量模式，所以我们要测量的是半径  $R$ 。当然你也可以选择缠绕模式作准绳。缠绕模式中有一个正比于  $R$  的能量标度；

根据不确定原理，我们所能够测量的长度为  $1/R$ 。综上所述，对于选定的紧致圆环，利用动量模式下的准绳将测得很大的半径  $R$ ；而利用缠绕模式下的准绳测得的将是很小的半径  $1/R$ 。两者所测得的半径实际上是等价的。对于用动量模式和缠绕模式测量的其他任意距离，都可以类似地讨论。两种准绳给出的测量结果彼此互为倒数：一个大，另一个就小。

但在实际使用中，两种准绳还是有一点区别的。一种模式很轻；另一种模式就会很重（重的我们根本就不可能用什么办法产生出来）。我们只需要用一种模式测量距离——容易产生那种，根本不会注意到还有另外一种等效模式也可以测距离。这就是上面提到过的矛盾的答案。其实星系完全可以被“安装”进一个无穷小的点中：**但是你必须使用相同的方法测量宇宙的尺度和星系的尺度。**当我们提到  $10^{-96}$  米小的宇宙和 100 光年宽的星系时，我们其实使用了缠绕模式测量前者，而使用动量模式测量后者（反之亦然）。如果测量两个距离时，我们用的是同一种准绳，那就不会有上面提到的矛盾了。

## M 理论

人们必须要穷尽一个理论所导致的结果，  
不管最后的结果是些什么，我们必须接受它。

保罗·狄拉克 (Paul Dirac)

多亏有了 S 对偶性，我们才能探讨三种超弦理论强耦合区



域的行为。随着 I 型弦论耦合常数的增大，I 型弦论变成弱耦合的杂化  $SO(32)$  弦论。随着杂化  $SO(32)$  弦论耦合常数的增大，杂化  $SO(32)$  弦论变成弱耦合的 I 型弦论。II B 型弦论具有自对偶性：随着弦耦合常数的增大，理论可以用弱耦合区域描述。那么另外两种理论之间有没有类似的对偶性呢？II A 型超弦理论和杂化  $E(8) \times E(8)$  型弦论的强耦合区域是怎样的呢？

威滕在弦论 95 届大会上宣布了一些令他的跟随者们惊奇不已的关于 II A 型超弦理论强耦合极限的有关内容。随着 II A 型超弦理论的耦合常数逐渐增大，理论自动生成一个额外蜷曲维度！这样 II A 型超弦理论就成了一个十一维理论！这项研究之后不久，威滕和他的合作者帕特·哈罗瓦 (Petr Horava) 发现杂化  $E(8) \times E(8)$  型弦论中也有类似的情况：在强耦合极限下，理论生成十一维，只不过这次的额外维度是一条线段。

多年来，物理学家们一直相信超弦理论的临界时空维度就是十维。不过正是威滕，弦论最早的倡导者之一，又提出了 II A 型弦论是一个十一维理论。那么究竟是怎么回事呢？

首先需要指出的是，所谓的“弦论仅在十维空间中才有意义”与“强耦合理论存在于十一维空间”并不构成矛盾。这两句话之所以没有矛盾是因为十一维理论并不是一个弦理论：十一维宇宙中包含的是两维的隔膜（或称为膜）而不是一维的弦。对于一个微扰弦论来说，十的确是维度的临界值；而微扰理论以及将弦作为基本客体的概念正经受着现在的物理学家们的冲击，他们正试图超越这两者的局限。

但是物理学家们怎能对理论中新出现的维度视而不见呢？

为回答这个问题，我们最好先来看看随着弦耦合常数增大而从  $\text{II A}$  型理论中发展出来的圆环的半径。分析表明，圆环半径应该正比于耦合常数。如果耦合常数很大（强耦合极限下），那么半径也应该很大。于是十一维就会显现出来。但从一开始，物理学家们就假定耦合常数很小；他们之所以非得这样假定，是因为只有这样物理学家们才能够使用他们所熟悉的微扰论进行研究。其实，按弦的耦合常数进行微扰展开计算相当于按为零的圆环半径展开作微扰计算。换言之，一开始就已经假定薄膜的宽度是零，而这正是那个额外维度不可见的原因。膜的宽度为零，所以我们看到的是十维中的弦。

需要指出的第二点是：并不是每个人都对十一维理论的参与进来感到惊奇。比如迈克尔·达弗（Michael Duff，图 102），当其他的物理学家们都认为十维才是能引起众人兴趣的话题时，他仍然坚持探索十一维时空。之所以有些人会对十一维理论感兴趣，完全是因为十一维是具有超对称性的真实理论可能有的最大维度。大自然为什么不将所有的数目全都用上，偏偏要留一点呢？而且，一直以来，克莱默、朱利亚以及舍尔克的十一维超引力理论都是大统一理论最佳的候选之一。通过超引力的途径实现统一（用超对称扩充爱因斯坦理论以便将粒子物理纳入其中）与通过弦论的途径实现统一（扩充粒子物理以便将引力纳入其中）看起来都很有效。不过我们早前已经看到，十一维的超引力理论并不能很好地充当终极的统一理论。不过像达弗一样的物理学家相信像超引力这样不可思议的理论结构终将在物理学中扮演某种角色。十一这个数很特别。

尽管威滕在  $\text{II A}$  型弦论中发现了一个额外的维度，不过这



图 102 20 世纪 70 年代早期，还在伦敦皇家学院就读的迈克尔·达弗是诺贝尔物理奖得主阿卜杜斯·萨拉姆的一个学生。多年来，在大多数弦论物理学家更加钟情于十维理论时，达弗一直倡导十一维理论的研究。他现在是密歇根理论物理中心的主任

个作 II A 型理论的强耦合极限的十一维理论到底是个什么呢？弦论 95 届大会 9 年之后，物理学家仍旧无法回答这一问题。他们无法准确地定义这一理论。利用对偶性，物理学家们已经发现了这个理论的一些性质，但是还不能给出一个完整的定义，

研究进展得非常缓慢。物理学家们就像一群寻找裹着厚厚泥土的古器的考古学家，如果找到了古器，慢慢地清除表面的泥土后便可以研究这件古器了，只不过对于物理学家们来说，就连那件想找到的古器的影子还没见到呢。不过，威滕已经推出那个理论的一个重要方面：其低能理论应该是十一维的超引力！

现在来总结一下我们都学到了些什么。

在强有力的对偶性理论的帮助下，物理学家们能够进一步探索以前不清楚的五种超弦理论。各种理论之间有一个很复杂的关系网；人们可以从一个超弦理论出发，在对偶性的带领下到达所有其他的超弦理论。这样一来，在某种意义上，人们可以说这五种理论不过是某一理论的不同方面。而且，通过考察两个弦论——IIA 型弦论和杂化  $E(8) \times E(8)$  型弦论——的强耦合极限，人们得到了一种新型的理论：包含膜的十一维理论。

204  
205

我们可以这样看待这些信息：在过去的 30 年中，通过对超弦以及超引力的研究，人们逐渐认识到在所有这些理论背后隐藏着一个基本的深层结构——M 理论。五种基本的超弦理论以及威滕探讨的十一维理论并不是彼此不同的理论；它们只不过是更加基本的 M 理论在某些特殊情况下的极限。比如说，你从 M 理论的某个半径或耦合常数出发，最终得到的将是 IIA 型弦论；从另外一些值出发最终你得到的将是 IIB 型弦论（图 103）。所以我们有一个理论，六种极限——或者说真空。一个理论可以有几千种不同的真空，分别对应于不同的模场，这样也就意味着可以有几千种紧致化的可能性。

五种基本的超弦理论以及十一维理论都不比彼此更加基本。对偶性将其联系起来。图 103 上的六边形的六个点之间的

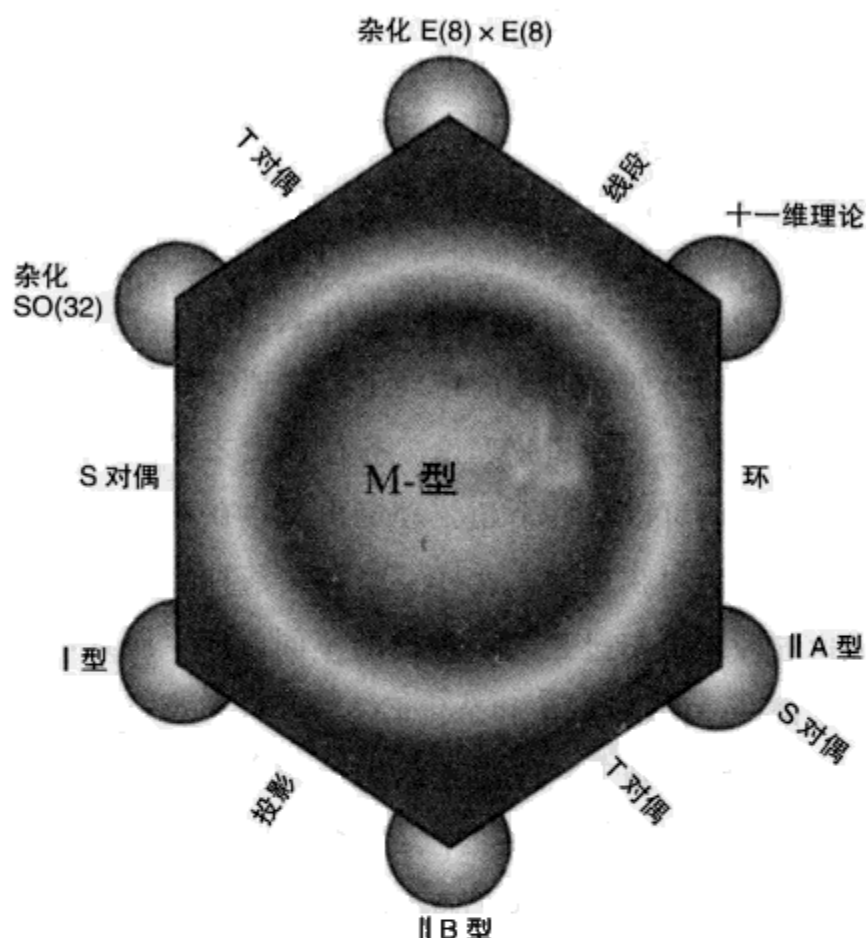


图 103 M 理论六边形。每一个角都是深层的 M 理论的一个特殊极限；共有五种弦论以及一个十一维理论。每两个角之间的边代表着将两个角的理论联系起来的对偶性。对偶性使得我们可以从一种极限的理论得到另一种极限的理论。比如，我们可以从 I 型理论出发，通过 S 对偶得到杂化 SO(32) 理论；紧致到一个环上的 SO(32) 理论是杂化  $E(8) \times E(8)$  理论的 T 对偶；而杂化  $E(8) \times E(8)$  理论又与十一维理论有关，后者紧致到线段上时，即与杂化弦理论对偶；而十一维理论紧致到环上时，就与 II A 型理论对偶；II A 理论紧致到环上的时候与 II B 型理论 T 对偶。最后，II B 型理论按照某种方式投影后，将得到 I 型理论。考虑到其他的紧致化时，上面的图会变得更加复杂



区别是深层理论的不同对称性，这里涉及的对称性是超对称性以及庞加莱对称性。这些极限之所以与众不同的另一个原因在于它们是物理学家们知道如何使用 M 理论进行计算的东西。我们之所以能够在这些极限下进行 M 理论计算，完全是因为存在可以用弱耦合弦论和十一维超引力表述的有效理论。图 103 中的大部分区域还都只是阴影：阴影部分代表的是 M 理论中耦合常数很大的区域——这样的区域微扰论失效，而非微扰理论我们还不知道。

有些作者将“M 理论”看做是图 103 右上顶点的十一维理论，其低能理论是十一维的超引力，这正是威滕在 1995 年讨论过的那个理论。大部分作者将包含五种基本的超弦理论以及一个十一维理论的基本的深层理论称为 M 理论。本书采用的是后面的说法。我们在后面不再探讨纯粹的弦理论问题，但会在包含了更高维度的膜以及弦的框架下讨论它，所以我们在后面用到 M 理论时指的就是统一理论。现在的很多作者在这个框架下讨论超弦问题，不过也许是打破习惯的时候了；不管最终理论是什么样子，我们现在能知道的是它不会仅仅是个弦论。

## 结 论

统一——统一——统一。

弗兰德里奇·冯·席勒 (Friedrich Von Schiller),

《威廉·泰尔》(William Tell)

在前面我曾经说过 M 理论中的“M”可以代表很多个不



同的意思：形而上，神秘，隔膜或者其他的什么。[1996年，其时在罗格斯大学的托马斯·班克斯（Thomas Banks）与斯蒂芬·森科（Stephen Shenker），得克萨斯大学的威利·费什勒（Willy Fischler），以及斯坦福大学的兰尼·萨斯金（Lenny Susskind），用存在于十一维时空中的膜建立了M理论，膜的空间位置由矩阵确定。这个影响巨大的“矩阵模型”给了M理论的“M”另一种意义——矩阵。]理论本身都还没有定论，所以叫什么名字自然也没有定论。M理论仍然保持着它的神秘性。前面讨论过的S对偶以及T对偶令人感到不可思议[所以M理论又含有“不可思议”之意（miraculous）]。所有这些都强烈地暗示着基本量子理论的存在，M理论的各个极限碰巧都是物理学家们在尝试将引力与其他力统一起来的过程中所得到的最好的理论，很难简单地将此视为巧合。虽然理论中的很多部分还不清楚，但它仍然不失为一个美妙的发现。数学家们也深深地着迷于M理论，由于M理论，数学的很多不同分支奇妙地联系了起来。

公正地说，对于M理论的一些责难指出了这个理论的短处。首先，M理论甚至都不是一个理论——至少与其他称之为理论的物理部分不一样。第二点，理论仍然没法与实验联系起来，比如，我们仍然不知道怎样算出标准模型中那大量的参数；我们也不知道为什么我们看到的宇宙只有三个空间维度而不是更多。宇宙常数的问题还是一头雾水：计算与实验观测还是相差一百多个量级。还有些批评意见则谴责整个M理论。

虽然有很多尖锐的批评，但同时也有很多因素表明M理论正是我们要找的统一理论，即便不是也值得我们尽可能地

其探索。目前的研究现状是很多想法只能在数学的层面上进行研究。不过，我们仍然期待未来的某一天所进行的那些探索会指引物理学家精确地检验理论；或许会从理论中找到某些可以用实验来检验的预言。我们在最后一章中将会看到，M 理论激发了很多新的灵感——本书的标题“疯狂的想法”——可能很快就能通过实验检验。

即便在没有实验检验的情况下，1996 年的一项关键性进展标志着 M 理论已经开始与物理学的其他部分接轨。M 理论的关键之处在于更高维度的隔膜或者膜的存在。膜的重要意义不仅在于揭示各种弦论对偶性，更在于没有膜 M 理论在数学上就不是自治的。1996 年，一些物理学家指出了对膜的理解可能会导致更好的理解黑洞。这些重要的进展正是我们下一章将要讨论的问题。

## 第九章 | 关于膜与黑洞

黑洞就是上帝消失的地方。

斯蒂芬·赖特 (Steven Wright)

物理学家们曾一度认为十维中的超弦理论本身就是真正的基本理论，不过实际情况并非如此。单独的超弦理论不可能是基本理论，因为五个理论中的两个与十一维理论对偶；而我们知道，十一维不能自治地定义微扰的超弦理论。除了弦之外，真正基本的非微扰理论必须包含其他一些内容。事实上，为了保持理论的自治，基本理论——或许我们可以将其称为 M 理论——必须包括一种称为  $p$ -膜的东西。这些非微扰的研究对象并不对应于弦的振荡态。其实，物理学家之所以引出 M 理论的概念，部分原因来自于对膜的性质的研究。我们在本章中将详细讲解膜的概念——并且讨论到目前为止 M 理论研究中的一项成就：更好地理解了黑洞。

## 膜

冰凉而又亲切的薄被迅速驱散烦恼。

鲁伯特·布鲁克 (Rubert Brooke),

《伟大的情人》(*The Great lover*)

我们知道超弦理论的低能极限是超引力理论，物理学家们正是在研究这个理论的时候遇到了膜的概念。超引力理论通常会有孤波（或孤子）解，而这样的解通常被解释为拓扑缺陷——正如磁单极子可以被视作大统一理论的拓扑缺陷。不管是超引力的拓扑缺陷还是大统一理论的拓扑缺陷，人们都从不曾观测到；不过，在平凡的普通世界里，人们却常常可以观测到类似的结构：晶体中常常会有拓扑缺陷，液态晶体中的各种类型的缺陷都很容易研究清楚（图 104）。所谓的液晶指的是失去了部分或全部的定位序；但是保有全部的定向序的晶体。想象一下：晃动一个装着很多牙签的长方形盒子，打开盒子，你会发现这些牙签差不多朝着相同的方向。但却没有确定的位置。牙签可以自由移动，但却趋向于指向同一方向。向列型液晶中杆状的分子结构也有类似的趋势。通过研究晶体中的缺陷，我们或许会对超引力理论中的缺陷有所认识。

超引力理论中的孤子或者说缺陷一般被称为  $p$ -膜 (brane)。这个名称是隔膜 (membrane) 的简称：最先被研究的膜是二维面或者称为隔膜，不过这并不意味着没有更高维度的膜存在。事实上， $p$ -膜中的这个  $p$  代表的就是可以在时空



FIRST MOVER

第一推动

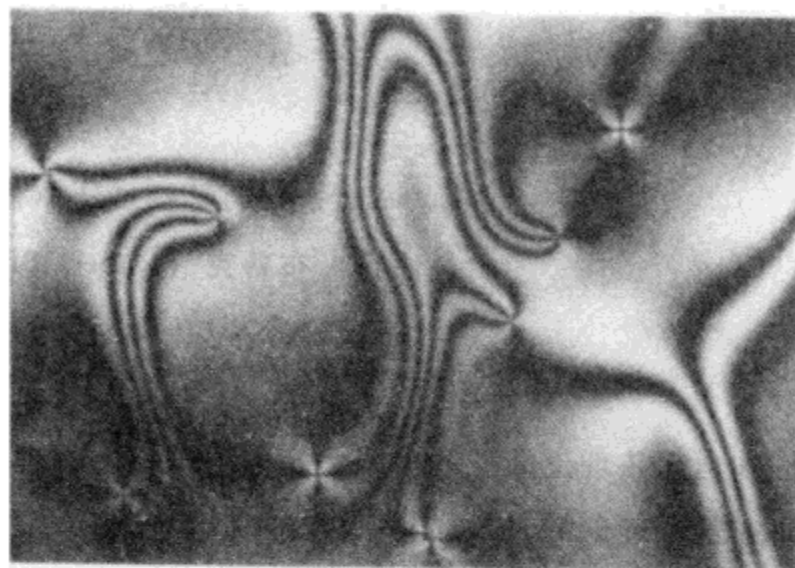


图 104 这是一幅偏振显微镜下的液晶照片。图中的某些点上会产生出四道黑色的“拂尘”。这样的一些点就是拓扑缺陷。晶体也有线缺陷或面缺陷。弦论中存在高维拓扑缺陷（膜）

中自由移动的  $p$  维空间客体。

209

膜的能量凝聚于其  $p$  维表面，相应的能量密度称为  $p$ -膜张力。0-膜就是点粒子，而能量密度就是粒子质量。1-膜就是弦（弦为一维实体），而膜张力就是弦的张力。除了点粒子和弦，还有 2-膜（2-膜就是薄片，像前面提到的隔膜），3-膜（看起来像一个颤动的吉露果子冻），甚至是更高维度的膜（那些更高维度的膜很难用平常生活中的经验比喻）。膜的维度要受到一个限制：时空中必须有足够的空间供膜来回移动；因此， $p+1$  必须小于或等于时空维度。我们日常生活于其中的时空维度是 4；原始的卡鲁扎-克莱因模型中的维度是 5；通常超弦存在于十维时空；M 理论允许十一维时空的存在。无论在何种情形中，时空中  $p$ -膜的最大维度必须要小于时空的维

度。比如，我们生活的这个四维世界中就不会有 6-膜存在。

既然弦是可能的统一工具，那么人们自然会认为弦论将会升级为膜理论。毕竟，高能物理的历史进程是从零维的研究对象（粒子）迈向一维的研究对象（弦）的过程；那么为什么不能把研究对象的维度变得更高呢？

事实上，对膜的研究最早始于 1962 年，比弦的研究还要早。在又一篇富于预见性的著名文章中，狄拉克探讨了一种模型，其中电子是闭合的隔膜，也可以想象成一个泡，这个隔膜的振荡生成  $\mu$  子（我们一直将其视为重质量版的电子）。作为一个电子模型，狄拉克的膜理论并不成功，不过狄拉克写出的方程一向能够以它的美打动人（图 105）。狄拉克在他的电子膜理论中所采用的数学正是现代物理学家用于描述膜的数学。既然狄拉克早在 1962 年就已讨论膜，弦物理学家们为什么不应该在统一的框架下讨论膜呢？

的确有一些弦物理学家探讨有关膜的问题。1986 年，得克萨斯大学的一个三人组——詹姆斯·休斯（James Hughes），刘君（Jun Liu，音译）以及约瑟夫·波金斯基（Joseph Polchinski）——证明可以将超对称与膜理论嫁接起来：超膜就这样诞生了。这三个人找到了一种数学上可能的超膜：六维时空中的 4-膜。接下来的一年，意大利的里雅斯特理论物理学国际中心的艾里克·博格肖夫（Eric Bergshoeff）与厄津·塞兹金（Ergin Sezgin）同剑桥大学的保罗·唐森发现了可以在十一维时空中运动的 2-膜的存在。2-膜是一个闭合薄片，就像泡一样。人们很快发现理论上可以有很多不同的膜存在，超对称性对膜的维度施加了很强的限制。物理学家们很快完成了一张膜

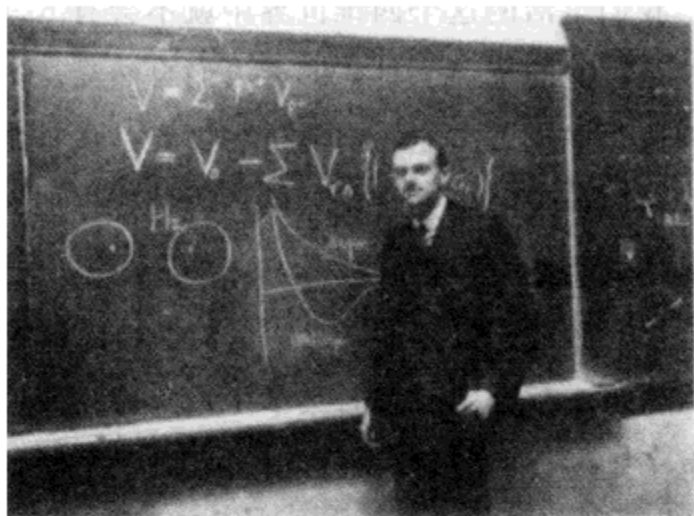


图 105 早在 1962 年，保罗·狄拉克就开始思考高能膜理论的可能性了。尽管他所探讨的模型并不成功，但狄拉克仍被他的方程中所蕴涵的美深深打动；在他建立自己的膜理论过程中所发展出来的一些数学，直到今天还被探索 M 理论的物理学家加以利用

**的扫描图：**在任意时空维度中可能存在的膜的维数（图 106）。在图中我们可以看到，全部十一维时空中都可能存在膜的存在（不过在某个理论中膜是否真的存在取决于理论细节）。

根据这张膜的扫描图，我们可以合理忽略掉一些膜：十一维中可能的仅是延展的物体（2-膜和 5-膜）。弦物理学家们的研究工作已经定下了时空的临界维度：要么十，要么十一。为什么要为那些弦论已经判了不可能的维度上的膜费心呢？根本上，弦物理学家们认为只有十维时空中的 1-膜是唯一可能有物理意义的点。

211 关于膜还有其他一些问题。弦论关键的一点是理论中有自旋为 2 的无质量粒子——引力子。根据早先在延展物体方面的



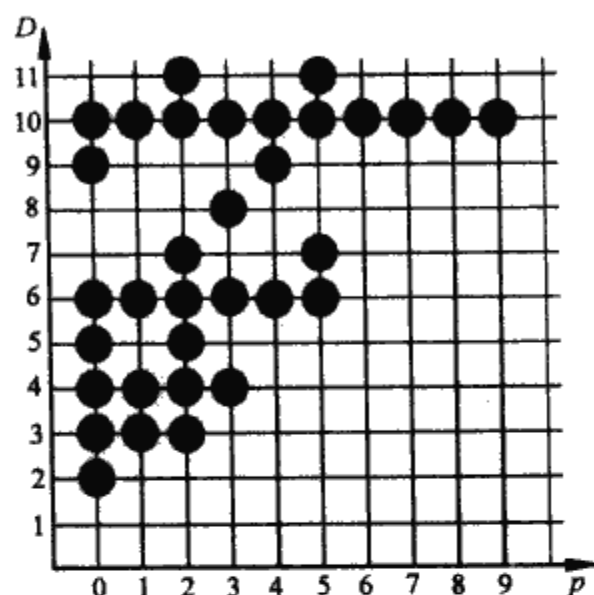


图 106 图中所示的是超对称膜的维数 ( $p$ ) 以及存在着膜的时空的维数 ( $D$ ) 之间的限制关系。网格上的点表示的是不同维数时空中可能的  $p$ -膜类型，这里时空维数上限为十一

研究，不可能构建一个包含了自旋为 2 的无质量粒子的膜理论。换言之，膜不能用于描述引力。而且，格林和施瓦茨已经证明了某些十维的超弦理论无反常存在。那么为什么非得用膜呢？

1987 年，塞兹金与他的两位同事——南加利福尼亚大学的伊特泽克·巴斯 (Itzhak Bars) 与 CERN 的克利斯托夫·波普 (Christopher Pope) ——一道证明了超对称性的膜理论中可以包含自旋为 2 的无质量引力子，但前提是膜存在于十一维时空中。于是十一这个数再次出现。巴斯和波普随后证明所有的超对称理论都将不可避免地遭遇反常，只有十维的弦论和十一维的膜理论可以免于此劫。再一次，人们发现十一维和十



维一样重要。另一个令人惊讶的结果出现于 1987 年。CERN 的一组物理学家——迈克尔·达弗，保罗·豪（Paul Howe），稻见武夫（Takeo Inami）以及凯尔劳格·斯戴勒（Kellogg Stelle）——探讨了十一维时空中运动的 2-膜。他们证明，如果十一维中有一维是环，那么膜就可以绕环蜷曲起来。如果膜的半径很小，那么膜看起来就像十维的弦一样！更准确地说，基于十一维理论的紧致化，人们将会得到 II A 型超弦理论。

弦论物理学家们真正开始认真地对待膜理论是在认识到  $p$ -膜可以看做是拓扑孤子，于是它就成了超引力理论的解。膜稳定并且天生非微扰。1990 年，安德鲁·斯特劳明格——最早探索杂化弦的卡拉比-丘紧致化的四位物理学家之一——证明了杂化弦方程可以产生一个 5-膜的孤子解。这位物理学家同时证明了随着孤子质量的增加，弦耦合常数会变小。这一结果意味着一个对偶关系：强耦合杂化弦与弱耦合 5-膜对偶。虽然这一对偶关系仍只是猜测，不过达弗和另外的一些人通过不同的办法证明了这一猜测是经得起怀疑的。我们在第八章中已经知道，20 世纪 90 年代物理学家们已经知道了如何判别各种对偶性假设是否有效，身为 BPS 态的膜，其性质是问题的关键。正是通过对膜的研究使得物理学家们跳出了弦的小圈子。弦当然是很重要的，不过它并不是一切。很明显，我们不能够只研究十维中的 1-膜或者十一维中的 2-膜，还需研究六维中的 3-膜，九维中的 4-膜，以及所有那些膜的扫描图上允许的理论。

## D-膜

他们必有其质的缺陷。

奥诺雷·德·巴尔扎克 (Honoré de Balzac),  
《幽谷百合》(*Le Lys dans la Vallée*)

1989年，得克萨斯大学的约瑟夫·波金斯基（图107）和他的学生罗伯特·利（Robert Leigh）及戴锦（Jin Dai，音译）发现了一种新型的膜。当时他们正在寻找拓扑缺陷——由于拓扑的优势而稳定的弦论方程的延展解。当时他们并没有立即意识到他们三人发现的重要性。直到1995年波金斯基利用

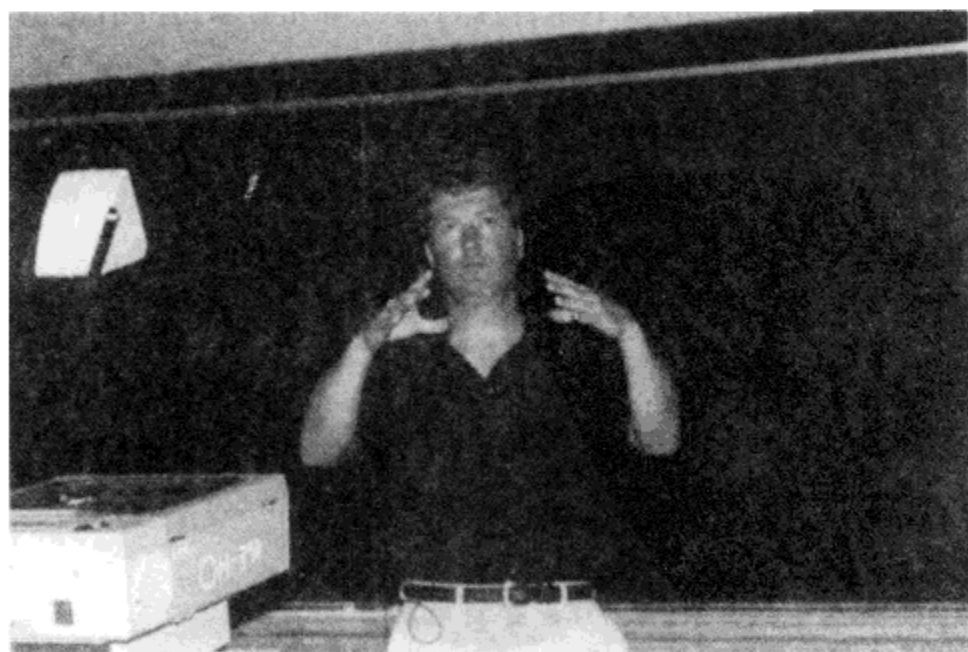


图107 约瑟夫·波金斯基发现了D-膜，这一发现使得人们可以简单准确地描述弦论的很多非微扰方面



对偶性复查他们原来发现的膜的性质时，这位物理学家才意识到他们三人早前的发现是多么的重要。

波金斯基及其学生研究了超弦所应当遵循的边界条件。不论何时，只要人们要描述弦的行为，边界条件——弦的端点所要满足的要求——都是极为重要的。比如，一根吉他弦，它的边界条件就是两端都是固定的。II 型超弦理论中，闭弦服从周期性边界条件，这是因为弦会绕回到自身的起点。I 型弦论中的开弦满足两个边界条件之一，如果弦的一端可以在时空中自由移动，弦的另一端就要固定在某个特别的流形上（这两个端点并不是非得固定在同一个流形上，不过那样也没问题）。满足后者的弦满足所谓的狄利克雷（Dirichlet）边界条件，狄利克雷边界条件是根据 19 世纪著名的数学家狄利克雷（图 108）命名的，这位伟大的数学家曾探讨过与研究对象边界有关的问题。弦的边界可以移动，不过范围有限——只能在其相连的流形上移动。这样的流形称为 D-膜（这里的 D 意指狄利克雷）。

213



图 108 约翰·狄利克雷是一位 19 世纪的数学家，他研究的是与边界条件有关的问题

简单说来，D-膜就是开弦能连于其上的客体。D-膜是一个动力学研究对象，可以弯曲或来回运动（特别要注意的是，D-膜可以与引力相互作用：D-膜可以与闭弦有耦合，而我们在第七章中已经知道，闭弦对应的正是引力。闭弦引力子与D-膜相互作用的时候，弦会张开，并且在相互作用过程中变成开弦，且弦的端点在膜上移动）。D-膜可以有各种形状或大小：可以是点状；也可以在某个方向上被拉伸到有限尺度；也可以在某个方向上无限拉伸。

如果D-膜的维度很重要，那么我们就应该称其为 $Dp$ -膜（其中 $p$ 代表维度）。超弦理论仅能存在于十维时空，与之相自洽的D-膜维度可以从 $-1 \sim 9$ 。图109所示的分别是 $D0$ -膜（一个点）， $D1$ -膜（一条曲线）， $D2$ -膜（一张面）。

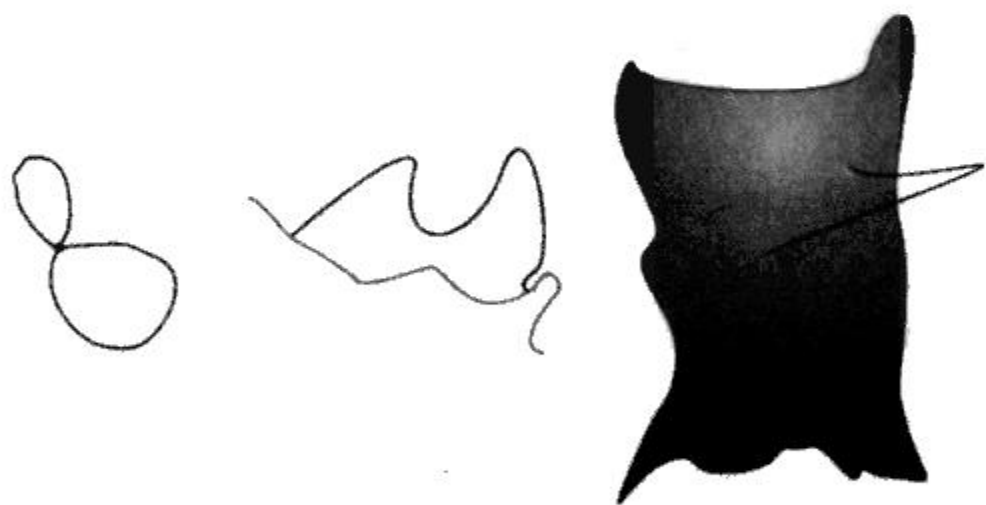


图109 左图中所示的是有两条弦（黑色曲线）附着其上的 $D0$ -膜（小灰点）；弦与膜紧紧相粘。中间图中所示的是有一条弦附着其上的 $D1$ -膜（灰色曲线）。弦的端点同样被限制在膜上，不过可以在膜上自由移动。右图中所示的是有一条弦附着其上的 $D2$ -膜。弦的端点可以在膜的二维面内自由移动



## 弦论中的 D-膜

下面列出五种微扰弦论中的 D-膜。I 型弦论有 D1-膜、D5-膜、D9-膜。II 型弦论有 D0-膜、D2-膜、D4-膜、D6-膜以及 D8-膜，而 IIB 型弦论有 D-1-膜、D1-膜、D3-膜、D5-膜、D7-膜以及 D9-膜；IIA 型弦论与 IIB 型弦论通过 T 对偶关联起来。所有的杂化弦都不包含 D-膜。

214 人们发现 D-膜有很多有趣的性质（至少在弱耦合的时候，可以用探讨弦的性质的办法探讨 D-膜）。我们在前面提到过，D-膜是动力学研究对象：可以移动并且可以与其他膜相互作用。D-膜具有质量并且具有各种各样的荷（比如电荷、磁荷）。因为开弦依附于 D-膜之上，所以关于 D-膜的有效理论应当是规范理论——我们知道描述我们日常生活于其中的这个大的低能世界的理论正是规范理论。而且，D-膜是 BPS 态，我们知道 BPS 态可以帮助物理学家研究很多非微扰性质（波金斯基的组就是充分利用 BPS 态来研究 D-膜的）。D-膜的另一个重要性质在于，如果两个 D-膜彼此平行，那么他们之间由引力而带来的吸引力就会被由各种荷带来的排斥力精确抵消。彼此平行的 D-膜之间没有剩余的力。你完全可以像玩扑克牌一样将 D-膜擦成一堆。我们稍后将会看到，D-膜的这一性质会带来很多有趣的应用。

最重要的是，物理学家们对理论的认识使得他们可以研究在各种情形下膜是如何相互作用的。这些研究使得物理学家们发现了一些 M 理论的最佳证据，他们逐渐认识到 M 理论的想

法或许真的是在正确的轨道上，D-膜使物理学家们获得了一些关于黑洞量子性质的模糊认识。

## 黑 洞

215

黑色并没那么黑。

乔治·坎宁 (George Canning),

《新道德》(New Morality)

引力非常之弱：远比大自然中仅存的另一种长程力——电磁相互作用力弱。如果你想看看引力相互作用到底有多么弱，那么不妨做这样一个小实验：用气球在你的衣服上摩擦几下，于是气球就会带电，用带电的气球去接触小纸屑，你会发现气球将小纸屑粘了起来。想想这是为什么？气球上带的电荷会对纸屑有吸引力，这个电荷之间的吸引力大于地球对纸屑的引力，于是小纸屑被提了起来。尽管引力这么的弱，宇宙中起主要作用的力仍然是引力而不是电磁力。其原因在于大自然中的电荷有两种——正电荷与负电荷——如果讨论的是聚集起来的大量物质，那么正负电荷的量一般是相等的，于是整体就会显示出电中性。而引力的“荷”——质量——只有一种类型，所以引力总表现为吸引力。考虑的问题中有越来越多的物质时，质量会越集越多，而电荷则趋向于零。因为物体之间的引力取决于质量的大小，所以引力会变得极其大。因此，我们感受不到来自于月球的电磁相互作用，但却知道月球的引力使得地球上的江河湖泊产生潮汐现象。



根据广义相对论，你可以无限量地聚集只有引力相互作用的物质，也就是说引力可以无限地增大，只要有更多的质量就行。就在爱因斯坦完成其广义相对论不久，当时还在俄国前线作为德国陆军炮兵中尉服役的德国天文学家卡尔·施瓦茨柴尔德（Karl Schwarzschild）证明：如果在很小的空间中聚集了足够大量的质量，则时空会发生弯曲；任何东西，即使是光，在引力的控制下都不能逃出这个小时空。这个弯曲的小时空区域当然就是黑洞。

施瓦茨柴尔德以及其后的很多位天文学家都认为黑洞并没有实际的物理意义；大多数物理学家都对黑洞的物理真实性表示怀疑。不过，今天已经有足够的证据显示大自然中是有黑洞存在的。天体物理学家已经在很多星系的中心探测到超质量的黑洞，我们的银河系中心可能也存在着黑洞。[当然你不可能真的看到一个黑洞，但是当物体螺旋地坠入其毁灭之渊的时候，你能够看到它发射出来的放射线。事实上，通过测量螺旋运动的物体的转动速率，你可以估计出中心位置的质量大小；通过测量螺旋运动的半径，可以估算出中心物体的半径。有了这两个信息，我们就可以知道中心物体的密度；从这个密度中，天体物理学家发现他们正在处理的东西其实就是黑洞。中心物体的质量总是很大，而其体积又总是很小，广义相对论方程告诉我们这个中心物体必定是黑洞，绝不可能是其他的什么（图 110）。]

我们并不需要去担心天体物理中的黑洞。比如我们来考虑一个质量差不多与太阳一样大的黑洞。在 9300 万千米之外——差不多地球到太阳的距离——黑洞造成的时空弯曲与太



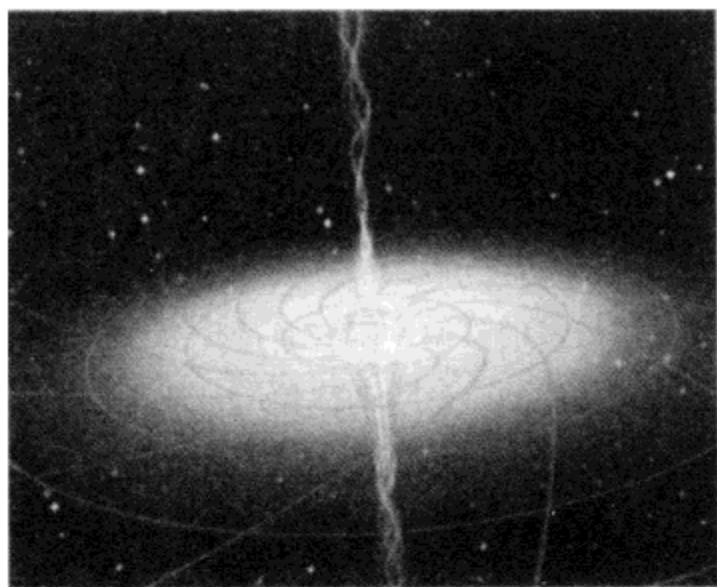


图 110 一位艺术家对物质被黑洞吸入的认识。一旦进入视界，物质就再不能逃脱。但是在黑洞的奇点处，物质喷柱可以从一个正好位于视界之外的区域逃逸。黑洞是大质量星体的最终宿命。如果一个星体，其晚期质量比太阳质量大 3 倍左右，那么它将不可避免地遭遇引力塌缩并最终成为一个黑洞。在星系核心常常可以找到比太阳质量大数百万倍的超重黑洞

阳造成的时空弯曲差不多。将太阳换成与其质量差不多大小的黑洞，各个行星仍然会按照其本来的轨道运行，唯一的区别在于太阳系会变冷一些。只有离黑洞很近的地方，时空才是真正发生了弯曲。只有经过视界——需要光速大小的速度才能逃离黑洞引力控制的空间边界——的时候，才真正失去逃离黑洞的机会。

真正受到黑洞威胁的是广义相对论，这样的说法是根据以下三点理由。

首先，按广义相对论，黑洞应该有一个奇点，奇点上物理



定律不起作用。奇点通常在视界之内，在视界之外平安无事；一旦进入视界就将遭遇奇点。看起来在宇宙中的某些位置，我们将失去我们全部的物理定律。这一点令人感到十分困扰。

217

第二点，尽管天体物理中的黑洞是有质量的——从几个太阳质量的大小直到几百万倍太阳质量——爱因斯坦理论并没有说不能产生更小质量的黑洞。不管通过什么办法，如果你能将任意大小的质量压缩到足够小的体积中，那么你就制造了一个黑洞。对于天体物理学中的黑洞，我们仅仅使用广义相对论就可以处理了，因为黑洞实在太大了，量子效应完全可以忽略不计。不过，要是讨论的是普朗克质量上的小黑洞——大约比质子质量大  $10^{19}$  倍，那么我们讨论的这个东西天然就是一个量子力学对象。所以，即使我们不管黑洞中的奇点问题，还有像普朗克质量大小的黑洞这样的研究对象，必须要用引力的量子理论来描述。既然我们终将要放弃广义相对论，那么那个更适合的理论是什么呢？M 理论，还是其他的什么理论呢？

第三，有关黑洞的熵的问题，这个问题比前两个问题更加微妙一些，值得我们花时间细细地讲述一番。

### 黑洞的熵

黑洞的熵这个想法相当深奥，熵的概念普遍地存在于日常生活中的大量物理现象中。这个概念最早源于热力学的初创时期，热力学是研究热运动的科学。直到科学家们开始研究蒸汽机的时候，熵的概念才逐渐清晰起来。当时蒸汽机是最受瞩目的研究领域之一，只有更好的理解蒸汽机背后的物理原理，人们才能更有效地利用它。总之，认识那些背后的原理才是一切

希望之所在。

早在 1824 年，年轻的法国科学家萨迪·卡诺（Sadi Carnot）就仔细地分析了蒸气机的工作原理。卡诺想做的是计算出人们从任意给定的热机中所能得到的总功。他逐渐认识到一台热机的有用功与热机工作的高温热源和低温热源的温差有关。不过在一个封闭系统中，高温热源和低温热源之间的温差总是随着时间的变化而降低。于是有用功就随着时间的变化而减少。卡诺认识到的问题只对热机成立。1850 年，德国物理学家鲁道夫·克劳修斯（Rudolf Clausius）推广了卡诺的发现。克劳修斯将一个系统中无法获得的能量称为系统的熵。于是克劳修斯提出，任何封闭系统的熵总是随时间而增加的。这一陈述——著名的热力学第二定律的一个版本——对于所有的封闭系统都成立，不管是对蒸汽机、电冰箱还是地球都是如此。熵是物理学中内涵最为深刻的一个概念。

不过熵到底是什么呢？19 世纪 90 年代，奥地利物理学家路德维格·波尔兹曼（Ludwig Boltzmann）从更加基本的定律中推得热力学第二定律。波尔兹曼论证道，如果你同意气体是由无规则运动的分子组成，那么原则上你就可以用概率的方法计算出各种感兴趣的物理量，甚至是熵。根据波尔兹曼的观点，系统的熵可以被认为是系统混乱程度的量度：熵越高，意味着系统的混乱程度越高，随机性越强。所以，一副扑克牌还没有开封的时候熵最低，因为这个时候扑克牌处于最有序的状态；洗牌之后，扑克牌的熵变高了，因为这个时候扑克牌被打乱了。我们也可以将熵视作组分元素按所有可能的方式累计成系统能量的方式数目。所以接近绝对零度的气体的熵非常之

218



低，因为气体分子只有很少的几种能量分配方式。如果全部气体分子都静止在一个地方，不能运动，那么我们所面对的就是一个高度有序的系统。升高温度，气体分子开始运动，系统就会处于各种各样的状态中，于是熵也随之增加。

早在分子的概念被物理学家们明确接受之前，波尔兹曼的想法就诞生了。物质分子性的确证直到波尔兹曼逝世之后才出现。所谓的布朗运动——在显微镜下可以看到悬浮在水中的花粉作无规则运动——只有在分子的框架下才能够得到很好的解释。不过早在分子直接被观测到之前，受波尔兹曼强大洞察力的影响，物理学家们已经相信分子的存在很可能是一个事实。波尔兹曼的思想不但赋予了熵一个很简洁的意义，而且还能够精确地计算出系统的熵：用众所周知的统计技术列出系统中所有要素全部可能的微观分布数。

只需要很少的修改，就可以将波尔兹曼的工作移至量子力学中。按术语说，系统的“微观分布”就是“微观态”。因此要计算系统的熵，你所要做的就是数出系统的量子微观态的数目。恰当地选取单位，系统的熵就等于微观态数的对数。因此熵是一个可以精确定义的量子力学概念。这里再重复一次：熵是物理学中最有价值最具普遍意义的概念之一。

现在我们回到要讨论的问题——黑洞。20 世纪 60 年代，斯蒂芬·霍金（Stephen Hawking）证明黑洞视界的面积永不减少；无论通过哪种相互作用，黑洞视界的面积只能增加。

219 1972 年，普林斯顿大学的雅克布·贝肯斯坦（Jacob Bekenstein）指出这一行为类似于热力学第二定律中的熵。他提出从视界的面积应该能够精确地得到黑洞熵的大小。

## 视界面积永不减少

假定我们将一个质量为  $M_1$ 、视界面积为  $A_1$  的黑洞与一个质量为  $M_2$ 、视界面积为  $A_2$  的黑洞接合到一起。新的黑洞质量就是  $M_1 + M_2$ ——两个黑洞质量的相加。视界面积正比于黑洞质量的平方，所以新的黑洞视界面积正比于  $(M_1 + M_2)^2$ ——这个数大于  $A_1 + A_2$ ，也就是说黑洞的视界面积增加。如果一颗星星掉落到黑洞上，则黑洞的面积增加；如果一颗行星、一颗彗星甚至一团灰尘掉落到黑洞上，黑洞的面积也会增加。不管什么东西，只要掉落到黑洞上，黑洞的面积就会增加。

在贝肯斯坦看来，黑洞有熵是合乎道理的。假如你将一个完全混乱的系统（也就是一个熵极高的系统）中的全部东西都倒到黑洞中去。那你剩下的就是一个空空的系统了，空的系统当然就是有序系统，因此熵很低。那么原来的那些熵跑到哪去了呢？如果熵只能增加，那么它必定存在于另外的某处。于是贝肯斯坦自然想到，黑洞的面积增加了——这就是熵的去处。

霍金一开始并不同意贝肯斯坦的观点。这里有三处可疑的地方。首先，黑洞看起来是一个很简单研究对象，看起来不像会拥有很高的熵；一旦你知道了黑洞的质量、荷以及自旋，你就可以说你差不多完全搞清楚黑洞了。（有趣的是，这就像我们在前几章中讲述基本粒子。一旦你了解了一个基本粒子的一些基本性质，你就可以说了解了这个基本粒子的全部。难道黑洞与基本粒子有某种关系？）具有很高的熵的系统是一个高



度无序的系统。但黑洞又是这么简单，怎么会高度无序呢？第二点，我们知道一个系统的熵本质上就是这个系统的微观量子状态数，至少对于我们了解的每个物理系统都是如此。那么我们先假设对于黑洞也是如此。但黑洞正是广义相对论的精粹之所在，不管是霍金还是其他的什么人，大家都不知道如何将广义相对论与量子力学结合到一起。第三点，根据热力学，如果黑洞真的有由黑洞视界面积给出的熵的话，那么黑洞也需要有一个温度——正比于视界面上引力场强度的温度。但黑洞要是真的有温度了，那它就应该辐射能量。对于贝肯斯坦的想法来说，这一点看起来是致命的：黑洞不能辐射，只能吸收，黑洞怎么能不是黑的呢？

1974年，霍金对物理学做出了他一辈子最大的贡献。他证明了黑洞其实根本不黑（图111）。霍金仔细地研究了接近黑洞视界的区域的情况，只不过这次他用的是量子力学的观点。在某种意义上，他可以将量子力学与引力结合起来；虽然不管怎样都不能算是一个完整的引力量子理论，但的确是接近于黑洞视界处强烈弯曲的时空中情况的量子力学描述。那么那里到底会发生些什么呢？我们知道，量子力学允许虚粒子对的产生，只要这对正反粒子在不确定原理所给出的时间内湮灭，大自然根本就不会在意它们是否真的存在过。试想一下，一对虚光子突然出现（光子自身的反粒子）。假如光子产生于视界之外，则黑洞的引力就会将一个光子吸入其中，这个被吸入到黑洞中的光子再也无法与外边的世界取得联系；那个一同产生的光子就永远地失去了它的湮灭伙伴。于是这个处于视界之外的光子就成了真实存在的光子。并且由于引力场，这个光子

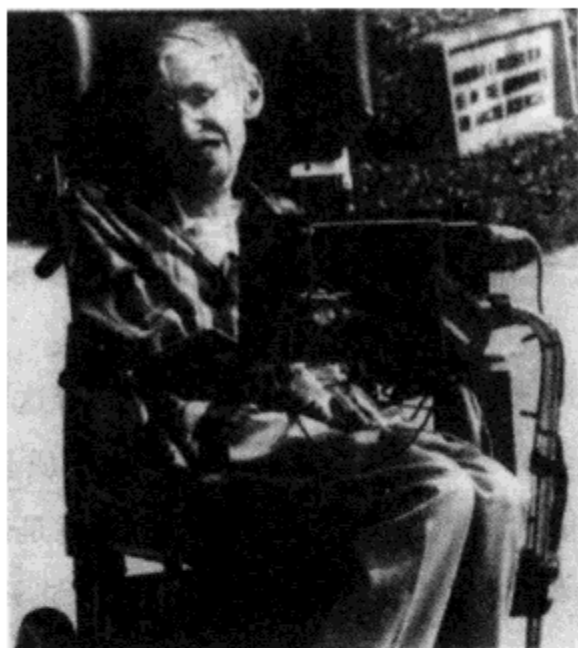


图 111 1974 年，剑桥大学的斯蒂芬·霍金宣称黑洞并不真黑：它们也可以辐射能量。多亏有了 M 理论，人们才能更加透彻地理解霍金的这一成果

获得了一份能量，于是就会离开黑洞。对于远离黑洞的观测者来说，黑洞突然辐射出一个光子。粒子对不断地产生，一个粒子跌入黑洞，一个粒子发射出去，这样一个连续的过程意味着黑洞可以向外辐射。黑洞发光，具有温度！

221

霍金的计算同时表明，一个黑洞的质量越大，温度就越低。事实上，任何天体物理学上的黑洞温度只比绝对零度多一点，还不足一度。我们探测不到这样小的辐射，所以霍金的发现并没有实际意义（天文学上可能发现的最小也就是最热的黑洞很可能是超新星爆发之后所形成的。这样的黑洞温度大约  $10^{-7}$  开尔文）。但从理论的观点看来，黑洞必须要有温度——



因此必然有熵。恰当的选择单位，黑洞的熵正好是其视界面积的  $1/4$ 。黑洞的熵非常之大，即使是天文学上最小的黑洞的熵也是非常巨大。一个质量为  $10^{30}$  千克的黑洞，微观态的数目将会高达  $10^{10^{16}}$ ，这个数大到难以想象，黑洞是一个混乱度极高的研究对象。这样一来，人们当然会欣然接受贝肯斯坦的想法。

但如果黑洞真的处于无序中，那么支配着这种无序状态的微观态又是什么呢？广义相对论说黑洞具有质量、荷以及自旋。还有什么能允许黑洞中存在无序——也就是熵呢？直到霍金做出他的发现 23 年之后，科学家们才能够开始回答这一问题。

1996 年，我们在前面的故事中提到的弦物理学家安德鲁·斯特劳明格（图 112）与卡姆兰·瓦法发现有一种工具他们可以利用来形成黑洞的微观态的描述方法，也就是说计算出黑洞的熵。这个工具就是 M 理论，因为它是包含了引力的量子理论。（传统的弦论也是包含了引力的量子理论，可是人们并没有尝试用它去计算黑洞的熵。之所以如此是因为没有使用弦论计算强耦合区域结果的办法。而微观黑洞当然是一个强耦合区域的研究对象。）斯特劳明格与瓦法知道使用 D-膜研究非微扰区域的问题。D-膜正是解开黑洞的微观性质之谜的关键。我们在前面曾经提到过，D-膜的性质之一是引力可以与电磁斥力相互抵消。这就意味着你可以将很多个 D-膜擦起来，形成一个有你想要的质量的研究对象（这个很重的研究对象荟萃着理论物理学家的智慧与想象力；并不是我们可以要求天文学家去寻找的物理对象）。比方说，你可以将 D1-膜——





图 112 1985 年，安德鲁·斯特劳明格（左）与堪德拉斯、霍洛维茨以及威滕合作了一篇论文，这篇论文成了第一次超弦革命的高峰之作。1996 年，斯特劳明格与卡姆兰·瓦法（右）合作的一篇论文又成了第二次超弦革命的高峰之作

弦——绕着紧致维度蜷曲起来；一直这样干下去，你就会得到一个非常重的东西。你也可以将一个高维的 D-膜绕在一个多维紧致空间上；再往上多绕一些 D-膜，你又会得到那个很重的东西。关键就在于，如果你将一个 D-膜按正确的方式绕在紧致维度上，一直这样绕下去，你最后得到一个像是黑洞的东西。再重复一次，这样由 D-膜建构起来的黑洞并不是真正的天文学上的黑洞；并不是天文学家有可能在超新星爆发后的残余物或者强爆星系中心能够找到的黑洞，它只不过是一个假想



中的黑洞。不过，在整本书中我们已经多次见过理想实验的威力了。斯特劳明格-瓦法理想黑洞的好处在于，我们巨大的理论武器库中的全部弹药都可以派上用场。

弦论中可以有很多不同类型的黑洞——不同维度的黑洞，不同荷的黑洞，等等。斯特劳明格和瓦法的首要任务是找出具有最简单性质的黑洞供他们研究之用。很快，两人找到了最简单的理想黑洞类型：临界黑洞（extremal black hole）。临界黑洞具有一个可以抵消霍金辐射的蒸发过程的荷。不过令人感兴趣的223 黑洞应该是“灰洞”，就是说可以发射放射线的黑洞；临界黑洞的霍金温度为零，只是老老实实在地待在那里。临界黑洞也具有其荷能够允许的最小质量，这一点使得它们成为一种BPS态。所有的这些性质都使得临界黑洞看起来毫无意趣，不过斯特劳明格和瓦法相信，这样的黑洞一定是他们两人能够掌控得了的。

找到要研究的黑洞之后，斯特劳明格和瓦法需要做的就是找到构建这样黑洞的方式，因为只有真的构建一个这样的黑洞，他们才能真正开始计算。最终，两人发现他们可以完整地勾画出一个五维黑洞。他们从熟知的十维II B型黑洞出发并将其中的五维紧致化在一个圆环面（就是一个油炸面圈）上。然后，他们将D5-膜与D1-膜绕在紧致维度上，造出了一个缠绕膜的束缚态；继续绕膜，这个研究对象的质量就会不断增加。于是他们就造出了一个黑洞；并不是天文学中所说的天体物理学黑洞，而是完全出自于想象的理想黑洞。理想黑洞的美妙之处在于，其创造者熟知有关这个黑洞的一切。毕竟，这个黑洞就是出自他们之手。于是斯特劳明格和瓦法就可以使用标

准的统计技术列出这个处于混乱状态的膜的全部微观状态数——他们从而算出了这个黑洞的熵。

就像波尔兹曼通过列出气体分子全部可能的分布数算出气体的熵，人们也可以通过列出微观状态数的办法计算出黑洞的熵；不过如果给出的是错误结果，那么一切都毫无意义。有趣的是，斯特劳明格和瓦法完全不知道其黑洞的贝肯斯坦-霍金熵；没有人知道。没有人想到过要去计算这样一个假想的五维临界黑洞的视界面积。所以当斯特劳明格和瓦法最终计算出贝肯斯坦-霍金熵的时候，他们感到相当吃惊，因为他们的计算结果与先前利用膜的方法计算出来的结果完全一致。

这一结果令人非常惊奇！

斯特劳明格和瓦法利用两种方法描述黑洞的熵，而两种结果惊人的一致。黑洞熵的贝肯斯坦-霍金表述当然有其意义，不过这一表述不能使人更好地理解黑洞的熵，就像气体熵的克劳修斯表述不能使人更好地认识气体的性质一样。而黑洞熵的斯特劳明格-瓦法表述却使人用更加深刻的概念来理解黑洞，这一点正如气体熵的玻尔兹曼表述使得人们可以从分子的角度更好地理解气体。

五维的临界黑洞是最无意趣的假想对象，只根据这一特例情形下的计算还不能做出肯定的结论，毕竟，所得到的结果可能只在这一简单情况下成立。只有在大量地分析了不同类型的黑洞之后，物理学家们才能相信这一结果的意义。比如，对于那些能放出霍金辐射的黑洞是否也有这样的结论呢？列出微观状态数的办法还能用在这里吗？考虑过最简单的黑洞之后，斯特劳明格及其同事加里·霍洛维茨——就是在1984年与斯特

224



劳明格合作写出那篇研究紧致于卡拉比-丘流形上的弦论的论文的霍洛维茨——研究了亚简单的黑洞类型：五维中略偏离的临界的黑洞。这一黑洞有霍金温度并可以向外辐射能量。普林斯顿大学的科蒂斯·卡兰（Curtis Callan）及其学生胡安·马德西纳（Juan Maldacena）也独立研究了这一问题。两组人马由处于混乱状态的 D5-膜与 D1-膜中所计算出来的辐射率与从广义相对论性黑洞所得到的霍金辐射的表达式完全一致。同时，临界的五维转动黑洞也被证明有正确的贝肯斯坦-霍金熵。两种方法给出的结果完全一致，人们完全有理由相信一切并非巧合。

很快，物理学家们就创造出四维黑洞，这一黑洞已经与真实的天文学黑洞很类似了（不过仍然不是天文学意义上的怪物）。四维黑洞霍金温度与辐射的计算与广义相对论结果完全一致。印度孟买的塔塔基础研究所（Tata Institute of Fundamental Research，英文缩写为 TIFR）的斯米尔·马萨（Smir Mathur）和麻省理工学院的萨美特·达斯（Sumit Das）计算出了暖黑洞开始变成绝对零度时的辐射率，他们再次发现 M 理论的计算结果与广义相对论的计算结果一致。

不久，斯特劳明格与马德西纳开始计算黑洞辐射的完整能量谱。如果你按霍金的方式用广义相对论计算，你就会发现黑洞的视界会辐射热谱——与由于温度而有的黑体辐射谱一样。从远离黑洞的位置看，所辐射的谱会有所改变，这是由于发射粒子要逃出黑洞的引力势阱。对能量谱的修正可以被整理为所谓的灰体因子，该因子为频率的复杂函数。斯特劳明格与马德西纳分别用经典的霍金方法与 M 理论的方法计算了取决于频

率的修正。结果如何？还是一如既往的精确符合。这样的结果引人注目，因为灰体因子是频率的复杂函数；如果两种理论之间没有深刻的内在联系，你是不可能得到如此这般惊人一致的结果的。

看起来，黑洞表面与 M 理论之间有一种很深刻的对应关系。但是这种对应关系要告诉我们的是什么呢？对于这一问题的回答代表着今日 M 理论的最高点。

## 第十章 | 我们的世界是一幅全息图

一幅呆板的全息图所反映出来的真实能有什么用呢？

阿诺德·雷莫 (Arnold Rimmer),

《红矮星号》(Red Dwarf)

赫拉尔杜斯·特霍夫特是现代物理学领域最深刻最具原创性的思想家之一。在前几章中我们已经看到，正是有了特霍夫特在规范理论重正化性质方面的工作，物理学家才得以建立粒子物理的标准模型。而他在磁单极子方面的工作，则使得人们可以在更深层次上理解大统一理论。除此之外，特霍夫特在其他很多物理学领域也做出过很多重要贡献。在他的先驱性工作之后，直到今日还有很多物理学家进行着后继工作（由于篇幅所限，本书不能一一详述）。在 1984 年之后的 10 年间，特霍夫特逐渐淡出高能物理理论研究的主流。格林与施瓦茨发现了反常相消之后，大多数理论学家转而投身探索超弦理论。不过，按特霍夫特自己的话说，他无法彻底了解超弦理论基础的逻辑自洽性，在特霍夫特看来，超弦理论引发的問題同它解决

的问题一样多。

因此，特霍夫特的目标是走另一条路来建立引力的量子理论，于是他开始涉足现代物理学最为疯狂又最有趣的全息原理。超弦理论的建立者之一，莱昂纳德·萨斯金随后详细说明了特霍夫特的想法。不过，特霍夫特再次成为高能物理学的主流人物，还是在物理学家们认识到 M 理论遵循全息原理之后的事情。

226

不管主流与否，我们的这个宇宙遵循全息原理的想法带来了许多真正奇异的可能性。在某些具体的公式体系下，你，亲爱的读者，只是一幅全息图；我们生活于其中的这个三维世界可能是虚幻的；那些相信地球是平坦的人很可能是对的，虽然他们自己并不能理解自己为什么正确。

我们从信息开始来讲解这些思想，而与信息密切相关的则是熵。

## 熵

最大的无序状态乃是我们所谓的平衡。

T·E·劳伦斯 (T. E. Lawrence)

《智慧的七大支柱》(Seven Pillars of Wisdom)

前面我们已经讲过熵的概念。熵是一个在我们实际生活中真真切切能感受到的概念。克劳修斯所讨论的蒸汽机就是一个例子。我们已经反复强调过，熵——这里指的是热力学熵——是所有科学中最有用的概念之一。在波尔兹曼的指引下，我们



在更深层次上认识了熵，熵并不仅仅是某个系统中无用功的量子度。熵表征的是系统具有相同能量的不同微观状态数。同克劳修斯的热力学熵一样，玻尔兹曼熵的单位也是能量除以温度。

熵还有另外一种定义。1948年，贝尔研究所的一位研究员克劳德·香农（Claude Shannon，图 113）将熵的概念引入到应用数学的一个分支——信息论中。香农感兴趣的是如何量化通讯中所携带的大量信息。估量信息的数量不像估量信息的价值那样重要。“I love you”这句话只包含 10 个 ASCII 码，

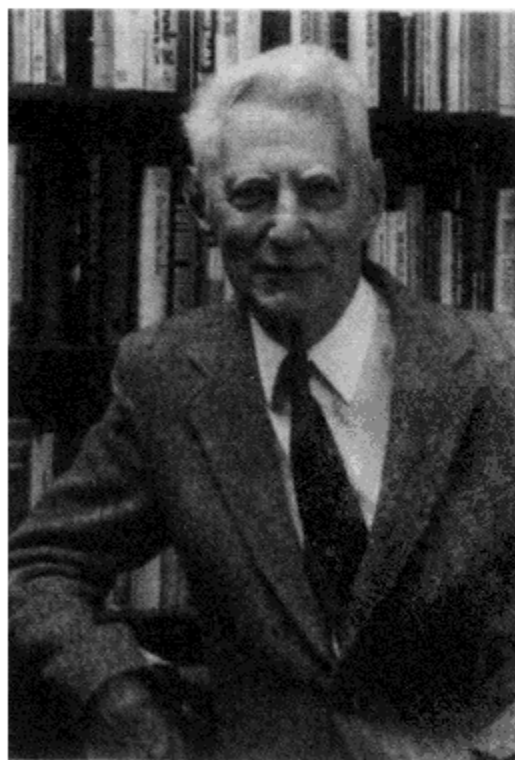


图 113 克劳德·香农在其 1948 年的论文《通讯的数学理论》（A mathematical theory of communication）中建立了现代电信学的基本理论框架。香农关于信息的某些观点对物理学家们的思想也有所影响



但在某些特殊的场景下，这句话是无价的；当然，在另外一些场景中，这句话可能毫无意义，因此信息的价值是依赖于具体场景的。不过，很多时候，人们需要知道的是数量，客观地估算通讯中所携带的信息数量有时极端重要。

227

香农证明一条消息中所携带的有用信息数量等于是/否问题的答案数目，这个数目就是我们编码时要用到的位（bit）数。（比方说，你的八位好朋友——阿比盖尔，比尔，凯瑟琳，戴维，艾米丽，弗莱德，吉连以及哈罗德——参加一次抽奖活动。你的合作者主持抽奖并且知道奖券在谁的手里。你只能问你的合作者三个问题，并且根据这些问题的答案猜出奖券在谁的手里。于是你就可以问：获奖者是女的吗？如果答案为否，则立即消除四种可能性。接着你问：获奖者的姓由四个字母构成吗？答案将再次去掉两种可能性。最后你问：获奖者是最后两个人中的高个吗？于是答案水落石出。所以宣布谁是获奖者这条消息只要三位信息就可以表达清楚了。当然这里举的是一个人为的例子，但其原理在其他的例子中也通用。）香农的信息定义在通信产业及密码系统中扮演重要角色，在语言学和语音学中也占有一席之地。而且，理论学家们现在倾向于认为这种信息类型在物理学中也起着基本作用。

描述一条消息中所携带的有用信息的方程在形式上与波尔兹曼热力学熵的公式一致，所以在与著名的数学家约翰·冯·诺伊曼（John von Neumann）讨论后，香农将他的量也称为熵，同时他采用“位”作为熵的单位——和计算机中所用的位一模一样。

像这样重复利用术语常会出错。毕竟，是/否问题的答案

228



数目与热的流动一点关系都没有，那么热力学熵为什么会和香农熵有共同之处呢？我们是不是应该用不同的名字来描述这两种截然不同的概念呢？进一步的思考之后，我们会发现信息的香农熵的确与热力学的波尔兹曼熵存在某种联系：我们需要一定量的香农熵来实现波尔兹曼公式所列的各种微观态排列。难道这两个概念就应该有同样的名字？也许吧，可能在深层次上两者真是一回事。

要是我们将香农熵和波尔兹曼熵看成是一回事，那么有两块绊脚石必须搬走。第一块绊脚石是两者所选取的单位不一样：香农熵的单位是位，而波尔兹曼熵的单位是能量除以温度。幸运的是，这并不是一个真正的问题，恰当地选取约定，我们可以将两种熵的单位进行统一。第二块绊脚石是两种概念的标度不一样：香农熵要比波尔兹曼熵小很多个量级。比如，你正在看的这本书的香农熵大约是  $10^7$  位；假设你通过读出室温的办法判定波尔兹曼熵，那么你会发现这本书的波尔兹曼熵大约是  $10^{23}$  位。这个巨大的差别使得这两种熵很难等同起来。

这种量级上的差异很有启发性，很快就启发人们找到继续前进的路。两种熵的考察对象是不同类的事物，具有不同的自由度。香农熵关注的是这本书中带有的信息量，我交给出版商的电子手稿可以用一系列的位——0 或 1——表示；而另一方面，波尔兹曼熵取决于构成这本书的万亿个原子的运动状态，这里用到的自由度与计算香农熵的自由度——二进制方法，开/关——毫无共同之处。因此这两种熵有着巨大的差别毫不奇怪。

用书来储存信息当然费材费料。我们完全可以将同样数量

的信息存储在一小片计算机存储器中。存储芯片由比书小很多的物理材料构成，其中包含的波尔兹曼熵当然小得多。考虑到近年来计算机领域的飞速发展，越来越小的芯片却能存储越来越多的信息，我们完全有理由猜测未来的某一天一个原子就可以存储一位的信息。那一天到来的时候，这两种熵所用的自由度便会非常接近。如果我们用相同的自由度来计算两种熵，最后将会发现结果完全一致。这两种熵是等同的。

229

根据这样的发现，物理学家们认为，在深层次上宇宙是由信息组成的。从这个观点来看，我们平常使用的那些物理世界的基本概念——空间与时间、物质与能量——不过是信息流的二级概念。尽管有些物理学家认为所有这一切都是由于概念术语的混淆造成的，其结论经不起推敲；但是，将香农熵和波尔兹曼熵视作等同——当然是相同的自由度情况下——然后来看看这样会有什么结论，仍然是非常有意义的。那么从现在开始，我们就只谈熵。将两种熵视作等同会为我们带来一个令人着迷的问题，我们可以稍稍换个方式表达：在熵的计算中所用到的根本意义上的自由度是什么？任意一块物质，其真正的热力学熵究竟是什么？理论上，一定量的物质中所能包含的最大数目的熵是多少？

或许你会认为要是我们根本不知道物质的基本结构是什么样子就很难回答这个问题。本书告诉我们，物质包含原子；原子由原子核与荷外电子构成；原子核包含质子和中子；质子和中子由夸克构成；夸克可能只是弦的激发态。除非我们知道宇宙真正的最基本物质是什么，否则不可能真正计算出一样物体的熵。尽管看起来这样的问题超越了我们的能力，但是对黑洞



的研究却会给我们一些答案。

## 热力学实践

我们必须牢记的是这些理论不确定性并不是热力学家所要面对的实际问题。没有质子、夸克、超弦这些概念，我们仍然清楚地知道蒸汽机的热力学原理是怎么回事：蒸汽机内的低能情况并不能对质子有任何影响，更不用说什么夸克和超弦了。讨论蒸汽机的熵时，我们知道哪些才是需要考虑的自由度。即便如此，真正的热力学熵计算都不是一个实际问题，它只是一个我们应该回答的理论问题。

230

我们在前一章中已经看到，雅克布·贝肯斯坦假定黑洞的熵正比于其视界表面积。斯蒂芬·霍金随后证明黑洞的熵等于其视界表面积的  $1/4$ （以普朗克面积为单位，图 114）。按照贝肯斯坦的说法，当一个物体落入黑洞中时，它的熵并不是简单地消失；黑洞的质量增加导致黑洞表面积增加，于是黑洞的熵也随之增加。贝肯斯坦猜想对于任何与黑洞有关的过程，黑洞的熵与其视界之外的熵总和永不减少。热力学第二定律的推广形式仍然成立。1986 年，锡拉库扎大学的拉菲尔·索尔津（Rafael Sorkin）在非常基本的假设之上证明，我们计算黑洞的熵的时候，必须要将最基本的自由度包括进去——不论基本的自由度是什么。所以即便我们并不清楚物质的终极基本结构是什么，我们仍然可以计算黑洞的熵。

以上的论述导致了惊人的结果。我们来考虑下面这个理想实验。想象一个在某一时刻是由三维格点组成的宇宙。网格间

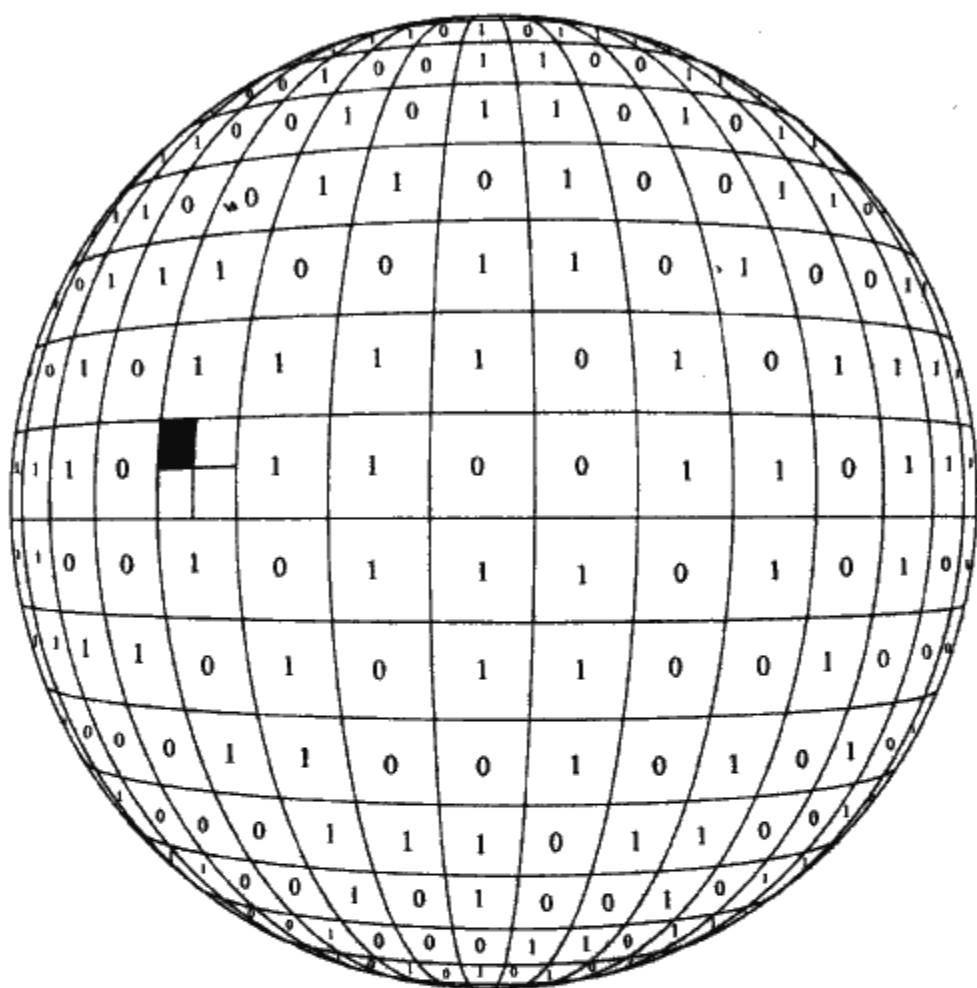


图 114 我们可以将黑洞的熵想象成视界熵的信息。每 1 位 (bit) 的信息对应于 4 普朗克面积，图中阴影所示的就是 1 普朗克面积

距为普朗克长度，即  $10^{-35}$  米，每一个格点上有一个粒子。每一个粒子可能处于两种态中的一种；即这个粒子就是自旋为  $1/2$  的费米子，其自旋可能向上也可能向下（这个模型并不特别稀奇；不管怎么说，我们毕竟不知道普朗克尺度上的物理如何。具体的细节并不重要，结论才是关键）。现在我们来考虑

231



一个这样的球形空间。我们知道这个空间中不同状态数，也就是说，我们能够计算出该空间的熵。我们很容易相信熵应当正比于空间的体积。这样的结果与常识相符：体积翻番，则状态数就翻番。但这个结论并不正确，至少当讨论的是引力的量子理论时不正确，原因显而易见。假设空间内的质量接近于引力塌缩极限，但还不是一个黑洞（因此没有视界）。质量全部在面积为  $A$  的闭合表面内；这里指的表面并不是视界面，只是空间的表面积。再向这一空间内加入一些质量促成引力塌缩，于是黑洞形成，视界面积应小于  $A$ 。相应的熵应小于  $A/4$ 。根据热力学第二定律，熵的总和永不减少。于是我们得到结论：空间内原始的熵应该小于等于  $A/4$ 。事实上，任何表面积为  $A$  的孤立系统，其熵不大于  $A/4$ 。这是一个一般性的结论，既不与到底是什么组成系统有关，也不与大自然的最基本物质究竟是什么有关；热力学第二定律——假如在与黑洞有关的过程中也成立的话——告诉我们一个系统的熵取决于其表面积，而不是体积。换一种方式来说就是，你能够存放于一个系统中的最大信息量取决于系统的表面积，而不是体积（别忘了我们这里讨论的是理论极限。即使近几十年来计算技术飞速进展，要达到这样的存储极限也非一日之功）。

这个结论很奇怪。有没有什么办法绕过这个结果呢？能不能向一个系统中不停地加入信息，以至于使熵超过表面面积的限制？比如，你现在要弄出一个书堆。你先放上大英图书馆的馆藏，然后再加上牛津大学图书馆，再加国会图书馆。这些书加在一起就是非常可观的香农熵以及波尔兹曼熵。此外，你开始堆书的时候，熵很明显会随着书的体积变化：将你的球形书

堆半径加倍，则体积变为 8 倍，8 倍的书意味着 8 倍的熵。但书堆的表面积只是半径的平方，所以半径加倍，表面积变为 4 倍。所以，很明显，你最终达到的状况一定是书本所在的空间内的熵超过了表面的熵，对吗？其实，并非如此。计算表明，一旦达到这样的情况，书堆就会在其自身重量的作用下崩塌并且形成一个黑洞。黑洞的熵是  $A/4$ 。如果你继续向这个黑洞中添书，视界的面积就将按照热力学第二定律要求的一般形式增长。

看起来没办法绕过这一点，一个物理系统中可能包含的最大数量的熵与这个物理系统的表面积有关，而不是体积。

## 全息原理

一沙一世界。

威廉·布雷克 (William Blake),

《天真的预示》(*Auguries of Innocence*)

正是考虑了信息与黑洞，再加上建立引力的量子理论的重重困难，特霍夫特提出了全息原理。在开始讨论这一原理之前，我们有必要先来了解一下全息究竟是什么意思。

## 全息技术

233

全息技术是在 1947 年由丹尼斯·盖伯 (Dennis Gabor) 发展起来的。盖伯当时在英国拉格比的大英汤普森-休斯敦公司研究实验室工作，1971 年由于这项发明获得诺贝尔奖。

今天，全息技术已无处不在。钞票使用全息技术防伪；广



告商采用廉价的全息图吸引消费者对产品加以关注；艺术品商店中销售的全息图片不过是二维的印刷品而已。但千万不要因为这些泛滥的全息产品而低估全息技术那了不起的性质。一幅全息图可以捕获一个物体所有的表观信息：全息图就是将三位物体的影像重现于二维表面的摄影技术（图 115）。[全息（hologram）这个名称是由其发明人盖伯根据希腊语起的，holo 意为“全部”，gram 来自于 gramma，意为“信息”。]

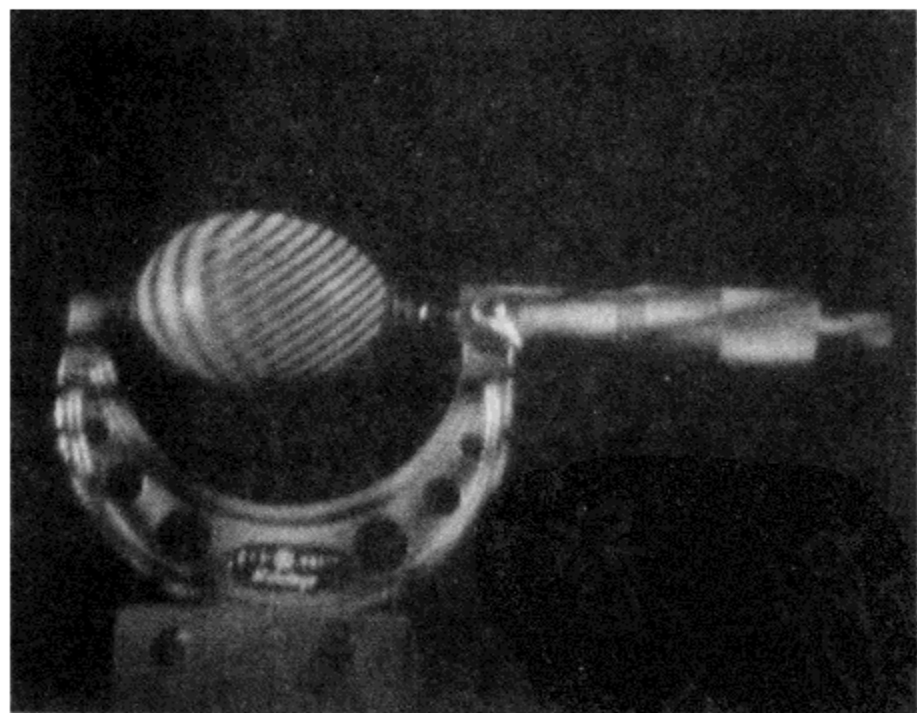


图 115 一幅双面曝光的全息图，图中是一个被测微计夹住的鸡蛋。除了图像富于震撼力（要在实际生活中见到才行）外，全息图像还有一系列科学用途。鸡蛋受到来自于测微计的压力时，就会产生图中这样的干涉图；这里测微计的间距变化与显出鸡蛋上条纹的光波长接近。这样的技术可以帮助人们了解物体受到外界压力时的反应



照片可以记录下从一个物体上反射的光的强度。物体上一个白颜色的点反射的光线要比从黑颜色的点反射的光线多。所以，比起“黑颜色”的点，“白颜色”的点反射的光线可以使底片上更多的卤化银感光。上百万个这样记录着不同光强的点组合到一起，就构成了一个物体的二维图像。

全息照相的工作原理有所不同。它记录下物体反射回来的光线的相位信息。用一束称为**布景光**（也常常称为物光）照亮物体，物体的物理特征会改变物光的强度和相位。反射物光与**参考光**发生干涉，参考光与物光具有相同的特征——相同的波长与强度。相干模式记录到胶片上，从而形成全息图像。

从物体上所有的点散射的物光与参考光干涉，胶片记录下的干涉条纹反映了相应的三维空间中的位置。物体的正面靠向观看者，而物体的后面则远离一些，中点恰好位于其间。这样二维胶片表面就显现出三维影像。

上述过程只有在高度相干光下才会得到比较理想的效果，而激光器产生的就是这类光。在激光器诞生的10年前，盖伯就利用非相干光源制作了第一张全息图，这张图代表着盖伯的天才。

黑洞最大的信息存储能力取决于黑洞的面积，而不是黑洞的体积，这一发现深深地震撼了特霍夫特，于是他提出了一个激进的建议。特霍夫特认为，任何引力的量子理论必须要能用某一空间表面的自由度描述空间内部的现象。他将此称为**全息原理**，因为这一原理相当于说，将所有用以描述三维图像的信息编码到二维的全息图像中。



全息原理非常怪异并且与直觉相悖。根据全息原理，所有发生在特定的三维区域（比如你的卧室）的物理都可以用存在于该区域边界上的二维空间（你卧室内的天花板或者地板）内的理论描述。论及引力的量子理论，全息原理意味着有关黑洞的全部信息都储存于视界外的二维表面，如图 116 所示。

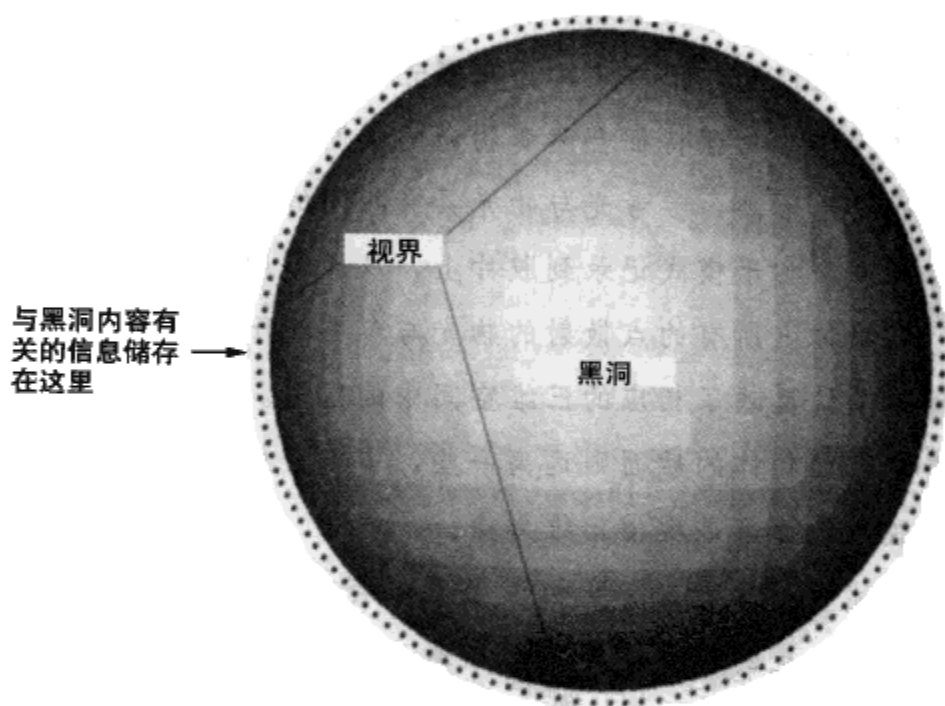


图 116 天文学黑洞——诸如在星系中心或者重质量星体引力塌缩后发现的那些——是一个三维物体。假如全息原理成立的话，那么所有发生在黑洞视界之内的物理都可以用定义在视界外二维表面上的物理理论描述。二维信息足以描述三维物理，这一点正如全息图像一样

234

全息原理认为我们这个世界本质上是两维的，只是不知何故，两维表面包含的信息所采用的编码方式使得我们还原的结果为三维世界。又或者是另外一种可能：也许我们本身就是生活在五维时空的边界面上的全息图像；而且如果全息原理正确

的话，我们就不能认识到这一点。我们就像柏拉图洞中的囚徒，相信世界是“平的”，但却遗忘了额外的维度。

特霍夫特和萨斯金在全息原理上做出开创性贡献之后，拉斐尔·波索（Raphael Bousso，图 117），斯蒂芬·霍金的一个学生，现在在加州大学伯克利分校工作，修改了原理的某些地方，解决了原始形式的某些问题。但真正使物理学家们开始坐下来认真考虑全息原理的是胡安·马德西纳发表于 1997 年的那篇著名论文。

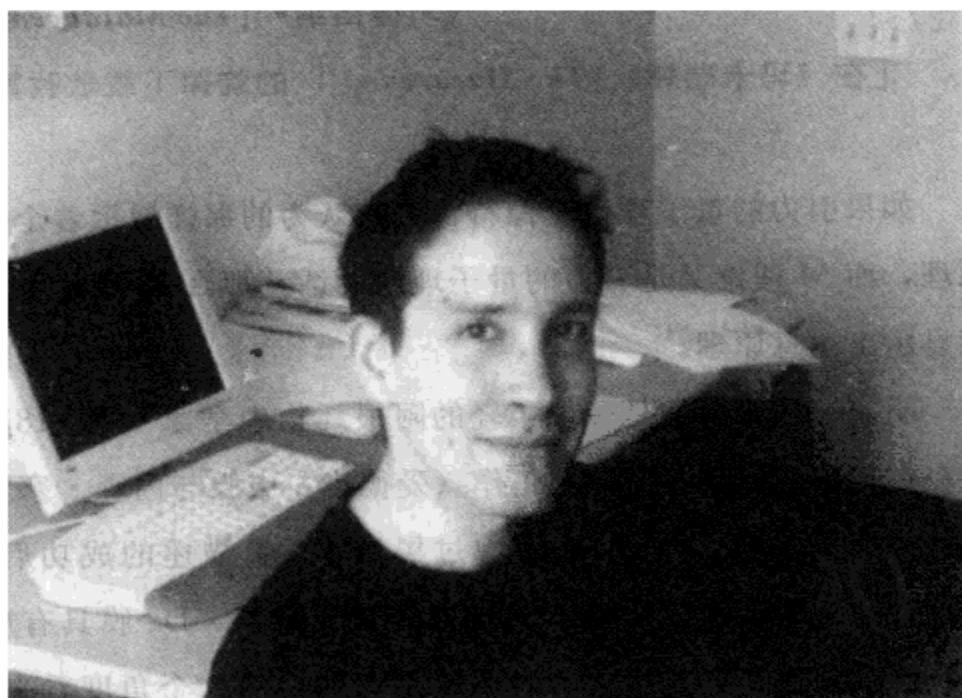


图 117 拉斐尔·波索在剑桥大学的时候是斯蒂芬·霍金的一位学生。现在他在加利福尼亚大学伯克利分校工作



FIRST MOVER

第一推动

## AdS/CFT 对应

从膜开始而膜是 BPS。

然后走近膜而空间是 AdS。

谁知道都是什么意思？反正我不知道。

哦哦！马德西纳！

杰弗·哈维 (Jeff Harvey)，

《马德西纳》(The Maldacena)

[在《玛卡瑞娜》(The Macarena)<sup>①</sup> 的旋律下载歌载舞]

如果引力的量子理论真像特霍夫特认为的那样展示着全息原理，而 M 理论又是引力的量子理论的话，那么 M 理论也应该显示出全息原理。

胡安·马德西纳是一位年轻的阿根廷物理学家 (图 118)，现在在普林斯顿高等研究院工作 (爱德华·威滕与内森·塞伯格也在那里工作)。仔细地考虑过黑洞 D-膜描述的成功后，马德西纳发现可以按两种不同的方式审视计算。D-膜具有质量，所以会使其嵌入其中的时空发生弯曲。从这个角度看来，引力十分重要。而另一方面，D-膜的量子理论又是规范理论。这两个不同的观察角度促使马德西纳想到，规范理论和弦论之间有某种联系，或许膜与弦的纠缠描述的并不仅仅是黑洞内部

<sup>①</sup> 译者注：《玛卡瑞娜》是 1996 年的著名舞曲。杰弗·哈维模仿该舞曲，写了这段玩笑之词。

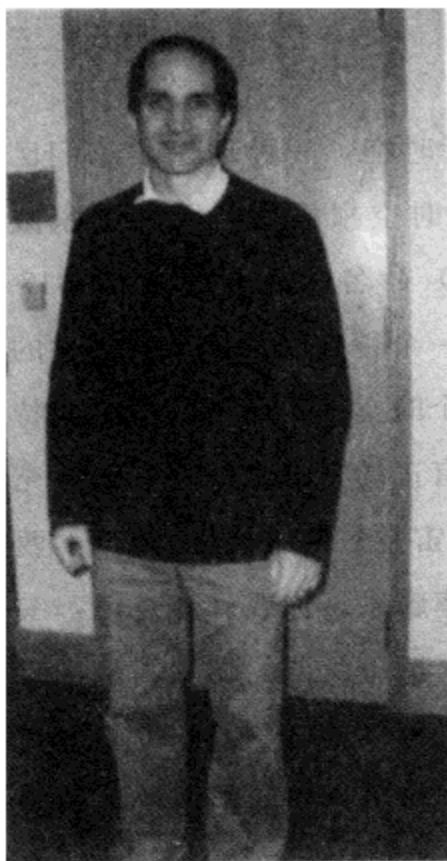


图 118 胡安·马德西纳出生于阿根廷； he 现在是普林斯顿高等研究所的一名物理学教授。马德西纳发表于 1997 年的一篇关于 AdS/CFT 对应的论文是近代物理学史上被引用次数最多的论文之一

的量子态，可能也有黑洞视界周围的时空几何。这一点形似全息原理，因为它将某一空间内的物理与定义在空间表面的物理联系了起来。这样的思考使得马德西纳猜想，作用于某一空间的引力理论与作用于时空边界的无引力量子场论之间可能存在着某种精确的对应关系。这正是一个全息原理的例子，而且来自于 M 理论。

马德西纳的猜想被称为 AdS/CFT 对应。这里我们要稍稍跑一下题，以便我们更好地理解马德西纳猜想说的究竟是什么。

我们先从这个对应关系的 AdS 部分说起。



## 反德·西特 (AdS) 时空

“AdS”代表的是反德·西特时空，一种理论学家们已研究多年的特别时空。反德·西特时空根据荷兰天文学家威列姆·德·西特 (Willem de Sitter) 命名，德·西特于 1917 年找到爱因斯坦广义相对论方程的一个特殊解。这个解描述的是具有高度对称性但却很奇怪的一个时空——所谓的德·西特时空，其中宇宙完全没有物质但却有正的宇宙常数（参见补充性文字“宇宙常数”，其中详述了宇宙常数的重要性）。德·西特发现这个空空的宇宙按极高的速率膨胀。你或许会奇怪：一个空无一物的宇宙何谈“膨胀”呢？这里所谓的膨胀，是指假如我们加入两个检验粒子——其质量可以忽略，因此彼此之间就没有引力相互作用——那么这两个粒子之间的距离就会随着时间而增加。事实上，德·西特空间中距离是按指数形式增加的。德·西特时空当然只是一个简单的理论模型，而且，这样一个奇怪的结构——高度对称，空空如也，并且不停地快速膨胀的时空——看起来与我们的真实世界（“块状”不对称分布的物质遍于其中——至少在小尺度上看是如此）毫无干系。但是在德·西特提出他的模型之后 80 年，近代科学最引人入胜的发现就是我们的宇宙正加速膨胀。在不久的将来我们的宇宙可以用德·西特时空近似描述。

德·西特时空中的宇宙常数是正的。如果我们将正取为负，则斥力将变成引力，于是我们得到一个反德·西特空间：简称 AdS。

与原始的德·西特空间一样，AdS 也是爱因斯坦方程简

单且高度对称的解（AdS 空间比德·西特空间更不像是真正的宇宙模型，这倒并不是因为其中空无一物，而是因为宇宙常数为负）。很难具体描述反德·西特空间究竟是什么样子，不过我们倒是可以将它想象成一个球的反面。球有正曲率的表面。这意味着球表面的三角形内角和大于  $180^\circ$ ，球面上的两条平行线总是相交于一点（欧几里得平面的曲率为零，三角形内角和为  $180^\circ$ ，平行线永不相交）。而 AdS 是负曲率表面（图 119），表面三角形内角和小于  $180^\circ$ ，任意给定直线有无数条过同一点的平行直线。比如马鞍就是一个具有负曲率的研究对

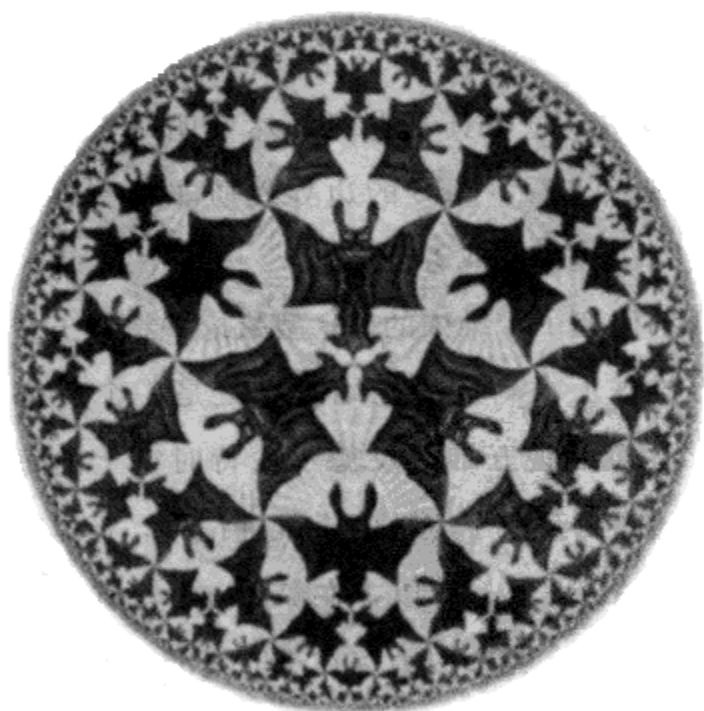


图 119 埃舍尔的著名木版画“圆形极限 IV”，也称为“天堂与地狱”。这幅画可以同来说明负曲率几何。在这张画中，每一个存在于“体空间”中的天使与魔鬼都同样大小；在接近于圆周的地方距离会拉长，空间的负曲率造成了扭曲。很多这样的图堆积在一起形成了一个塔，从塔的正面来看就是反德·西特空间的一幅快照



象。球面的对称性质在于球面上所有点的曲率都相同，曲率为正的常数。AdS 的对称性在于具有相同的负曲率。

AdS 时空具有一种奇特的边界：存在于无穷远。广义相对论方程告诉我们，由于曲率为负，因此有质量的物体达不到边界。不过光子却能。如果你发射出一个光子，光子将在有限时间内达到无限远边界；在边界反弹后，再经过一段有限时间，光子就会回到你身边。光子达到边界所花费的时间取决于宇宙常数的大小。如果我们生活在一个有足够大的负宇宙常数的 AdS 宇宙中，你的车头灯发出的光就会在一瞬间到达宇宙边缘并且反射回来，在你还来不及换挡之前就闪得你目眩。某种意义上讲，AdS 时空具有自然而然又明确定义的边界。从全息原理的观点来看，AdS 的边界性质非常有趣，因为全息图也需要有一个边界，或者说屏。

马德西纳研究了十维中的 II B 型弦论并将其五个维度紧致化在一个五维球上。剩余的五维时空就是一个反德·西特时空， $AdS_5$ 。也就是说五维的反德·西特时空上的每一点都有一个五维球。超弦存在于完整的十维理论中，但是有意义的物理内容发生在  $AdS_5$  上。所以，在  $AdS_5$  中，有一个具有明确定义的边界的弦论，其中引力存在于五维时空。

## 宇宙常数

还在爱因斯坦发展他的广义相对论的时候，他就认识到理论中的方程——将物质与时空联系起来——可以用来描述宇宙如何随时间演化。其方程的解意味着宇宙最终会塌缩，因为引



力是吸引力。但是在1917年爱因斯坦研究他的理论的年代，人们相信宇宙是静止的。为了解决这个问题，爱因斯坦为他的广义相对论方程引入了一个“宇宙常数”。这样的一项不会与整个方程有任何冲突，因此爱因斯坦这样做毫无问题。事实上，今天我们认为，毫无理由不从一开始就引入这样一项。

宇宙常数可正可负。正的宇宙常数可以产生长程排斥力，从而使宇宙避免塌缩。正的宇宙常数描述了一种反引力——其能量取决于真空(empty space)的存在。

20世纪20年代，天文学家们逐渐认识到宇宙并不是静止的；而是在不断扩张。因此不需要多余的排斥力存在，因为引力可以起到停止或者至少是减慢扩张的作用。于是爱因斯坦否定掉了宇宙常数，并将其称之为一生中“最大的失误”。

我们现在知道量子力学可以赋予空空如也的真空以能量，这些能量可以起到爱因斯坦所引入的宇宙常数的作用。(量子力学预言了“零点能”的存在。我们知道，粒子反粒子对不断地从真空中产生出来，尽管这样的粒子对很快就会湮灭，它们还是使得真空具有非零的势能。)所以宇宙常数自然出现。预言宇宙常数的理论值并与实验值相比较是理论学家关注的问题。

从天文学的观测中，天文学家认识到宇宙常数为正并且很小，也可能就是零(宇宙常数必定很小，如果宇宙常数为正且很大的话，我们的宇宙很久之前就会由于斥力而烟消云散了；如果宇宙常数为负且很大的话，我们的宇宙很早之前也会因为引力而塌缩)。有一个问题长久地困扰着理论学家，那就是使用现有的最好理论计算出来的宇宙常数值比实验值上限大了



$10^{120}$  次量级！这一差别被称为现代科学中最严重的不和谐之处。直到今天，还没有人知道怎样的理论框架才能消除这种歧离。

240

$AdS_5$  中的引力理论相对容易处理。事实上， $AdS_5$  的对称性和简单性使得计算变得容易多了。马德西纳从这个五维空间中的理论得出了许多结果。

### 共形场论 (CFT)

五维  $AdS$  时空的边界是四维表面（就像三维空间的表面是一个二维面一样）。受全息原理激发，马德西纳提出这个五维引力的弦论应该与四维时空边界上的点粒子量子场论对偶。他所找到的对偶场论是大  $N$  极限下的，具有  $N=4$  超对称的  $SU(N)$  规范理论。四维场论还具有另外一种对称性：没有优先的能量标度，于是理论在所有能量区域都一样，这就是共形场论 (CFT)。

241

综上所述，马德西纳猜想就是  $AdS/CFT$  对应（图 120）。五维反德·西特时空中引力的超弦理论与作用在时空边界上无引力的普通量子场论全息性对偶。量子场论在某种意义上是完整的引力理论的“全息图像”。引力在某种意义上就是场论。这是全息原理的第一个具体实现，一个令人惊讶的猜想。

马德西纳宣布他的猜想不久，普林斯顿的三位物理学家——斯蒂文·古博斯尔 (Steven Gubser)，伊戈·克莱班诺夫 (Igor Klebanov) 以及亚历山大·玻利雅科夫——在一篇论文中清楚开出可以用  $AdS/CFT$  对应计算的单子。这篇论文

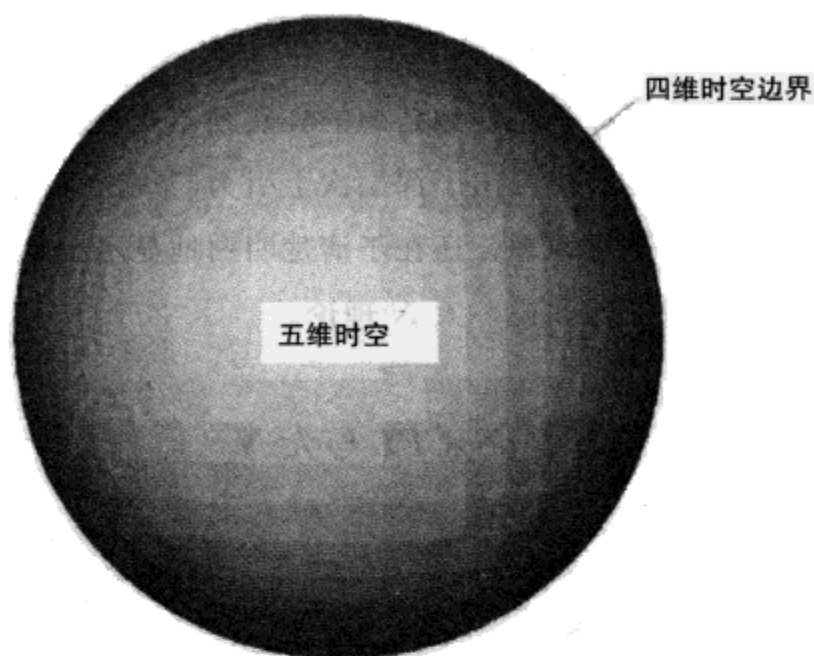


图 120 AdS/CFT 对应说的是某种包含引力的五维时空理论，可以用定义在四维时空边界上的无引力规范理论描述

发表之后仅仅四天，威滕发表了他对相同问题的独立研究，结果完全一致。于是这个猜想便有了牢固的根基。

不过当我们使用马德西纳最初的 AdS/CFT 对应公式研究我们感兴趣的真实世界时，发现有一个问题——五维的 AdS 空间不但是空的而且具有高度对称性，而我们的这个四维宇宙中却充满了杂乱的辐射，而且 CFT 是一个没有特定能标的超对称规范理论，这又与我们真实世界不同。至少在我们生活的低能量区域，我们的这个世界不具有超对称性；而且，真实世界有特别的能量标度并且由 QCD 这样的非共形规范理论描述。不过，马德西纳猜想实在太过引人注目了，物理学家们投入大量的精力将它推广到不同的时空和规范理论。将



AdS/CFT对应推广到能包括真实理论的地步是当前的研究热点。

物理学家们追捧马德西纳猜想的狂热劲不难理解。这并不仅仅在于马德西纳猜想提出了深层次上引力与规范理论一样以及实在的使用上全息原理，还在于清楚明白地显示出物理学的其他一些方面——比如说，大  $N$  理论。

### 将弦捆在一起：AdS/CFT 与大 $N$

我们不会停止探索

探索的尽头

将是我们起始的地方

我们将第一次了解那里

T·S·艾略特 (T. S. Eliot), 《四首四重奏·小快跑》

(*Four Quartets, Little Gidding*)

要说科学中最转弯抹角的发现历程，非马德西纳猜想莫属。马德西纳猜想意味着弦论绕了整个一个大圈。

我们先来回忆一下弦论发端于何处。历史上，人们首次提出弦论是为了尝试找到强相互作用——强子中夸克之间的相互作用——的正确理论。弦论应运而生并且确实为强相互作用的几个关键性质带来了直观感受。例如，我们可以将介子看做是两端分别有夸克与反夸克的一根弦。如果我们试图将其中的一个夸克孤立出来，比如使用高能对撞机来将强子中的一个夸克分离出来，那么弦就会被拉伸，而随着弦的拉伸，弦中的能量

就会逐渐变大。夸克还没来得及拉远到宏观距离，弦就会被拉断。量子力学不让我们看到孤立的夸克和反夸克：拉长的弦中总会有足够的能量来产生其他的正反夸克对。新产生的夸克对围绕着已经存在的反夸克，新产生的反夸克对围绕着已经存在的夸克。现在我们就有了两个介子，每一个都是由弦两端的正反夸克对组成。弦论模型潦草地勾勒出了一幅夸克禁闭的物理图像。同时，对于强相互作用的其他方面，弦论模型也能予以解释。于是，弦论就顺利地**从强子物理中产生出来**。

1973 年，物理学家们找到了**真正的强相互作用理论——量子色动力学**。量子色动力学是一个基于  $SU(3)$  对称性的规范理论，其中“3”代表夸克有三种色。时常懵懂不清的弦论模型只好让位于精确且很好理解的概念框架。不幸的是，尽管物理学家们早就有了强相互作用理论，可是在很多时候，人们根本无法求解量子色动力学；比如，人们仍然无法解释禁闭。人们毫不怀疑量子色动力学正是从原理上解释禁闭所需要的正确理论，可实践中，这里的数学实在是太难了，没人能用解析方式解决这一问题。就连通常的微扰论都失效了。

或许弦论可以再次充当强相互作用的救世主，将这个理论从难于处理的非微扰区域拯救出来。这个故事有两条发展脉络，而马德西纳发现的 AdS/CFT 对应将两者联系了起来。

故事的第一条线索开始于 1974 年，那一年特霍夫特带着有关如何计算强相互作用中最有趣方面（夸克禁闭、强子质量等）的建议出现在公众面前，他的建议或许是在这个领域人们提出过的最好建议。这些有趣的方面恰好也是 QCD 中最难对付的方面。特霍夫特的想法是，如果色的种类不是三种，而是



更多（这里用  $N$  代表这个比较大的数），也许问题就会比较好处理。所以特霍夫特的建议就是研究一个基于  $SU(N)$  群的规范理论来作为量子色动力学的简单近似。随后特霍夫特发展了他自己的想法。在研究过程中，特霍夫特注意到大  $N$  规范理论在很多方面都很像弦论。所以他猜想四维的  $SU(N)$  规范理论——QCD 的简化版——等价于某个弦论。如果这个猜想成立，自然就解释了弦论模型为什么能成功描述强子物理的很多方面。而且，特霍夫特证明了弦耦合常数正比于  $1/N$ ；因此，如果  $N$  很大的话，人们就可以使用微扰论来研究弦论。人们希望大  $N$  极限下理论可解，这样只要最后取  $N=3$ ，人们就回到了真实世界。这个想法很好，但不幸的是，假设色的数目很大，带来的简化并不足以让特霍夫特进行真正的计算。大  $N$  近似方面的进展慢了下来——不过 QCD 可能等价于弦论的想法则永不会消亡。

故事的第二条线索本书已经略述过。物理学家们发现弦论可以将包括引力在内的所有相互作用全部纳入其中。不过，前提是必须采用超对称；而且，只有当理论定义在十维空间中时，理论的微扰方法才能前后自治。事实上，十维时空中共有五种不同的自治弦论。进一步的工作表明自治的弦论不只要有弦，还要求膜——更高维度时空的子空间——的存在。膜的研究使物理学家们发现了各种超弦理论之间的对偶关系；五种超弦理论只不过是一种独特的统一理论——M 理论——的五种显示形式，而 M 理论可能定义在十一维时空中。D-膜的发现十分重要；在 M 理论的框架下，对 D-膜的研究帮助物理学家们在对黑洞微观性质方面的认识中前进了一大步。受黑洞性质

的有关研究启迪，再加上特霍夫特和萨斯金提出的全息原理，马德西纳猜想引力的弦理论与规范理论之间存在某种对应。这里的规范理论是一个具有  $SU(N)$  规范对称性的超对称理论，其中  $N$  很大，也就是说，一个大  $N$  理论！

特霍夫特提出他的建议 20 年之后，马德西纳发现了大  $N$  规范理论与超弦理论之间的联系。通往马德西纳猜想之路漫长曲折——但这条路的发展看起来就像是某种正在起作用的深层次理论的另一个暗示。

我们第一次有机会从一个统一理论（M 理论）回到粒子物理的标准模型。不用盲目地向未知理论摸索，物理学家们就可以利用引力与规范理论之间的对偶关系计算 QCD 中那些使用别的方式不能处理的物理量。一个在 QCD 中很难对付的物理量到了引力的对应图像中就变得直截了当。例如胶球质量的计算就是这样的例子，我们在 QCD 中很难计算胶球的质量，但是在对偶引力图景中就容易多了。近年来，物理学家已经开始使用这些方法，而且结果也鼓舞人心。大多数此类工作的结果都与规范理论中的结果很像，但我们也要看到，这些结果离真实世界的 QCD 还有一些差距。不过即使这样，我们还是可以说 QCD 的迷雾有渐散的趋势。

244

弦论首先作为夸克相互作用的理论被提了出来，不过那时它失败了。但在成为了一个引力理论后，弦论最终成了一个有用的夸克相互作用理论！

## 第十一章 | 当世界碰撞时

245

我认为你们这些科学家都是疯子。

西德尼·斯坦顿 (Sydney Stanton),  
《当世界毁灭时》(*When Worlds Collide*)

或许在所有尚未证实的物理学思想中，最重要的就是额外维度的存在了。只有当我们承认额外维度时，很多探索统一理论的方法才向我们敞开大门。没有额外维度的帮助，我们似乎很难统一各种各样的力。可是这些额外维度到底在哪呢？克莱因的开路工作完成后 60 年间，人们一直将此解释为：如果额外维度真的存在，那么它们一定很小，所以我们无法观测到。因此人们假设所有的额外维度都必须蜷曲到  $10^{-35}$  米的普朗克尺度。慢慢地，人们开始挑战这一假设，如 1983 年，莫斯科核物理研究所的两位物理学家瓦拉里·鲁巴柯夫 (Valery Rubakov) 和米沙·沙波什尼科夫 (Misha Shaposhnikov) 认为可能存在于我们尚未观测到的大额外维度。1990 年，CERN 的伊格内提奥斯·安东尼亚迪斯 (Ignatios Antoniadis, 图 121)



提出了一个认真的建议：弦论中的某些额外维可以长达  $10^{-19}$  米。这个尺度虽然也很小，可是毕竟比先前认为的长很多了。这样的建议本身并没什么问题，但是无论如何，这些想法都不是源于更深层次的原理。随后人们迎来了 M 理论。

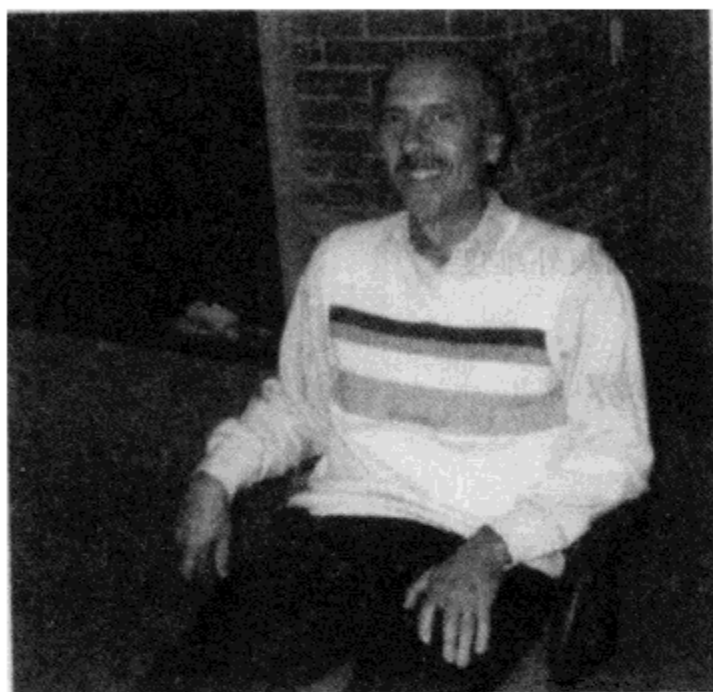


图 121 伊格内提奥斯·安东尼亚迪斯是 CERN 理论组的一员。他是最早提出弦的额外维度可能比普朗克标度大很多的物理学家之一

不管神秘未定义的 M 理论最终是什么，它都只能在大自然包含多维膜以及一维弦的情况下才有意义。如果人们承认膜，那么就有理由相信存在大的额外维度。尽管这些理由可能微不足道，而且 M 理论也不需要大的额外维度存在。但我们还是可以自由地假设它们存在。

理论学家们利用膜以及大额外维度的思想重新审视了很多



老问题。比如在宇宙学中，物理学家们可以用膜以及大额外维度的思想重新包装一个古老的信念：宇宙无始无终。某些物理学家将这样一些想法理论化：我们的世界周而复始地与另外的世界碰撞——两个膜（每个世界独踞其一）永恒地碰撞下去，每次碰撞事件都是一个大爆炸。这些想法虽然属于物理学的思辨范畴——其中的很多无疑是错的——但却是些强有力的思想。膜的有关学说为现代物理学带来了最令人激动的概念：或许未来的某一天，也许就在你读到这本书的时候，我们就能在高能实验上发现额外维度。

## 膜的新世界

美丽新世界。

威廉·莎士比亚，《暴风雨》(The Tempest)

1984 年第一次超弦革命之后，超弦理论流行起来，其一般性假设为理论所要求的六个空间维度蜷曲到可以与普朗克长度相比拟的量级。不过普朗克长度只有  $10^{-35}$  米，对于那些企盼着在实验上检验额外维度的物理学家来说，这是一个真正的坏消息。对于我们日常生活的低能世界来说，额外维度太小以至于根本观测不到。不过，额外维度应该是普朗克长度的量级。这一假设毕竟只是一个假设。我们很有必要追问一下额外维度的实验上限是多少。

在第六章（第 209 页至第 210 页）中我们看到，卡鲁扎-克莱因理论的一个关键预言是存在一个粒子“塔”。根据量子

力学，粒子具有波动性质的一面，并且这些波可能绕着额外维度传播。于是导致了原始的粒子有无穷多个高能版本，就是所谓的卡鲁扎-克莱因粒子。（弦论中也有同样的事情。）理论分析表明，卡鲁扎-克莱因粒子的能量间隔取决于额外维度的尺寸。因此，如果额外维度的半径是  $10^{-19}$  米，则粒子塔中的粒子能量间隔就是 1 TeV。比如  $Z^0$  粒子，其质量为 91 GeV，那么它的高能版本质量就分别为 1091 GeV，2091 GeV，3091 GeV，等等。高能对撞机实验上没能发现卡鲁扎-克莱因粒子这一事实，为额外维度的尺寸设置了一个上限：不大于  $10^{-18}$  米。

虽然  $10^{-18}$  米这个实验上限比普朗克长度大了很多，但对我们来说，额外维度仍然太小以至于无法直接探测。至少直到 1995 年，人们都相信这一点。额外维度尺寸的实验限制取决于我们探索额外维度所用的工具。波金斯基发现了 D-膜这一事件启发了物理学家们，他们重新认识了面对的问题并开始改变对额外维度的看法。

我们在前面的章节中看到，D-膜是可以在更高维度空间中自由运动的膜。（想象一下这些薄质、光滑、菱形的风筝：因为足够薄而可视为二维物体，可以在空荡的三维空间中自由往来。这个风筝在某些方面与嵌入在三维空间中的 D2-膜一样。）对 D-膜性质的研究开拓了一片新的研究领域，不过这里我们关注的 D-膜的重要性质是：D-膜的表面可以羁绊住开弦。这一性质之所以重要是因为人们相信标准模型中的粒子——夸克、轻子以及规范粒子——是开弦的激发态。所以，如果我们恰好生活在膜上，就很好地解释了为什么标准模型的

248



粒子应该局限于膜上了。另一方面，引力子是闭弦；可以自由往来于膜间。（想象一下前面说的那个风筝，现在它摇曳于细雨中。掉落在这个风筝上的大部分雨滴都只能在风筝上滑动——这些雨滴被禁锢于二维膜上，对应于标准模型中的粒子。另一些雨滴可能从风筝上滑落并可以在空中自由落下；这些雨滴对应的就是引力子。）

不过上面说的这些与大额外维度的可能性有什么关系呢？我们现在就来回答这一问题。部分引发了第二次超弦革命的工作是哈罗瓦和威滕所做的对  $E(8) \times E(8)$  杂化弦——从统一的角度看  $E(8) \times E(8)$  杂化弦曾一度被认为是最有希望的超弦理论——强耦合极限的探索。我们在前面已看到，当  $E(8) \times E(8)$  杂化弦处于强耦合区域的时候，它会产生出一个新的维度，于是成为一个十一维理论。但是这个新的维度并不是一个环。这个新的维度被束缚于两堵墙之间（图 122）。

249 在哈罗瓦-威滕图景中，所有的标准模型粒子都被限制在一面墙上，这面墙为一个有三个空间维度的时空；弦论中的其他六个空间维度被紧致化到卡拉比-丘流形上，小到不可观测。另一面墙有类似的结构，规范场局限于其表面。而引力可以在两面墙之间的体（bulk）空间中额外的第十一维度中自由往来。哈罗瓦（图 123）和威滕证明，如果这个额外的第十一维度相对大些——有  $10^{-30}$  米，则人们就可以在  $10^{-32}$  米实现三种力与引力的超对称统一（也许说  $10^{-30}$  米“相对较大”并不妥当，不过别忘了  $10^{-30}$  米已经比只有普朗克长度的紧致维度大了 1 万倍）。

哈罗瓦·威滕时空非常奇怪，如果这个理论真的是我们宇

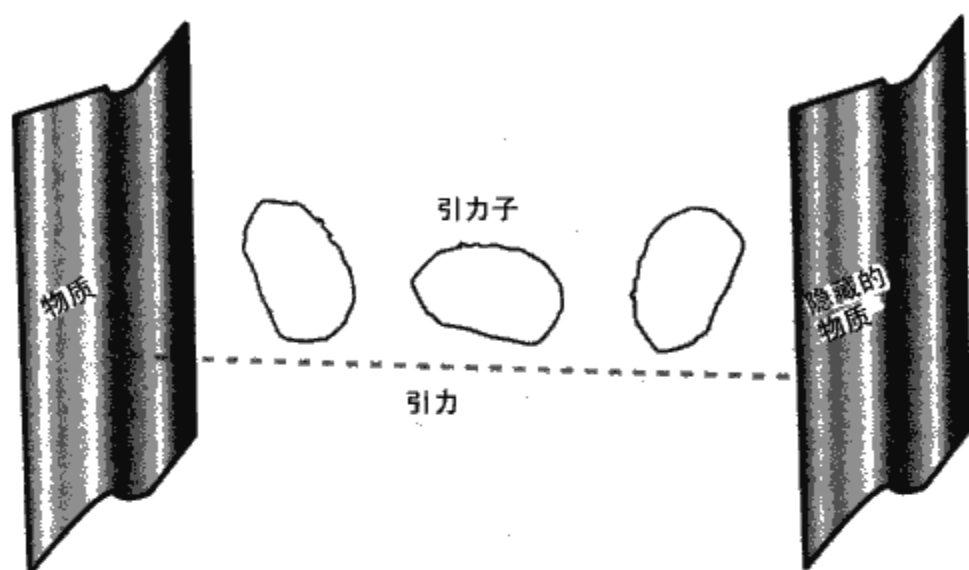


图 122 一个十一维时空的示意图，这个理论最早由哈罗瓦与威滕提出。这里的两个膜分别有三个大的空间维度——代表通常的  $(3+1)$  时空。而超弦理论的六个额外维度紧致于一个卡拉比-丘流形上，因而不可观测。本质上是闭弦的引力子，可以自由地在两道墙之间的  $(4+1)$  维体空间中运动。引力子可以感受到体空间的存在；而标准模型中的场则被局限在膜上

宙的模型，则意味着在  $10^{-30}$  米外，存在着一个与我们的宇宙平行的宇宙。但即使在这么近的情况下我们也看不到我们的兄弟宇宙。因为光子——以及所有我们可以用来探测的粒子——都被限制在我们的宇宙中。只有引力不受这个限制（图 124）。

虽然哈罗瓦-威滕理论中的额外维度比普朗克长度大很多，但是  $10^{-30}$  米仍然小到无法观测。别忘了他们发表这篇论文时的实验上限是  $10^{-18}$  米。不过我们可以将这种处理额外维度的方法保留下来。1998 年，三位研究人员——其时在斯坦福直线加速中心的尼玛·阿卡尼-哈密德（Nima Arkani-Hamed，

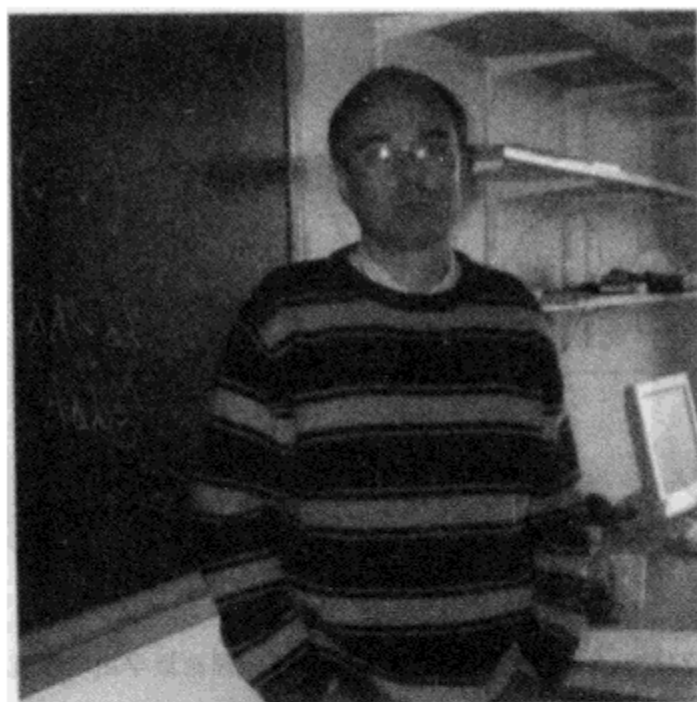


图 123 捷克人帕特·哈罗瓦目前在加利福尼亚大学伯克利分校理论物理中心工作。他在膜物理方面的研究很有影响力

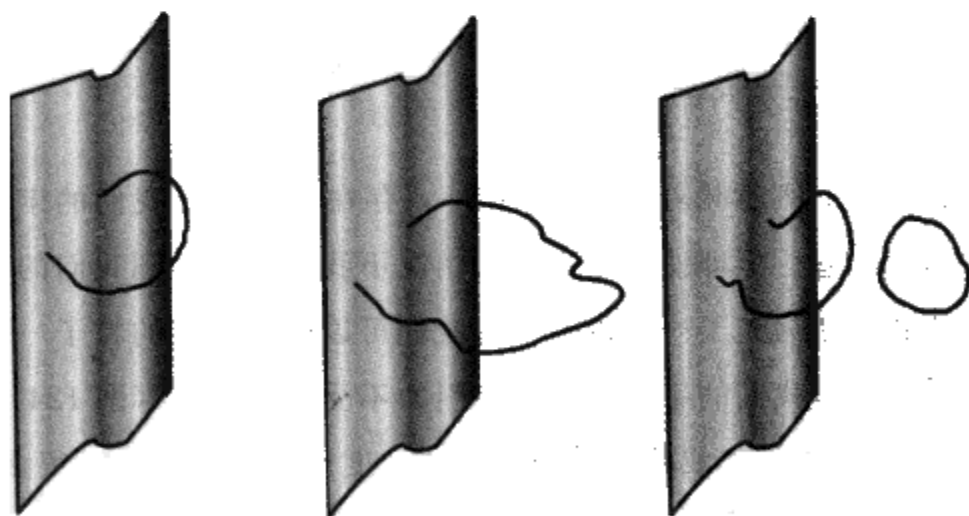


图 124 开弦（开弦的振动产生大家熟知的粒子，比如电子、夸克以及光子等）被固定在膜上，不能够脱离膜。对应于引力子的闭弦可以自由地离开弦

图 125)，斯坦福大学萨瓦斯·迪莫普洛斯 (Savas Dimopoulos, 图 126) 以及的里雅斯特国际理论物理中心的乔奇·德瓦利 (Georgi Dvali) ——沿着他们早先与伊格内提奥斯·安东尼亚迪斯所做的工作前进，证明了额外维度可能很大。

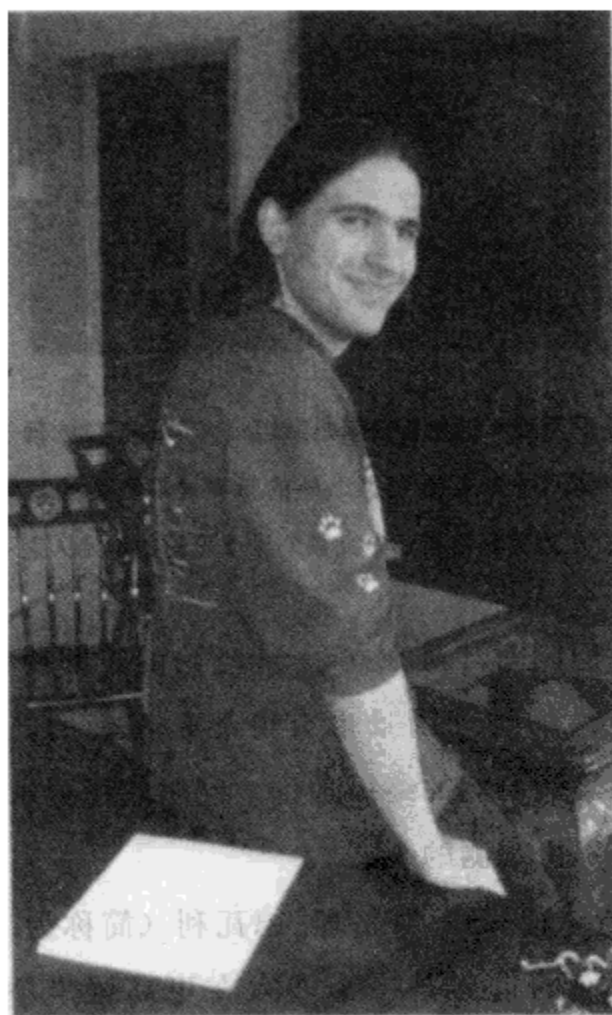


图 125 尼玛·阿卡尼-哈密德是哈佛大学的一位物理学教授。他的很多研究工作都与解决等级问题有关

在接着讨论之前，我们有必要强调一下，尽管阿卡尼-哈密德、迪莫普洛斯与德瓦利勾画出来的物理图景是受到了 M

250

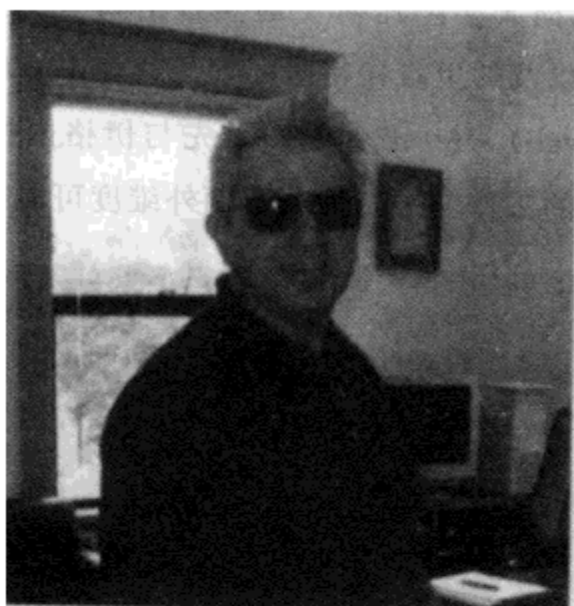


图 126 萨瓦斯·迪莫普洛斯是斯坦福大学的一位物理学教授。他是超对称标准模型——标准模型之外的新物理最主要的发展成果——的创始人之一；迪莫普洛斯还是大额外维度思想的创始人之一

理论的启发，但同时却是独立于 M 理论的。即使 M 理论是错误的，他们三人的物理图景也有可能是正确的。类似地，M 理论也可能就是大自然的终极理论，同时它所要求的额外维度可能真的就是不可观测的小。

阿卡尼-哈米德-迪莫普洛斯-德瓦利（简称为 ADD）的基本观点是，我们的世界是一个嵌入在更高维度空间中的 3 - 膜——一个时间维度加三个空间维度。标准模型被固定在膜上，故而感受不到更高的维度。而另一方面，引力必须要存在于所有维度之中。传统广义相对论的结论也是如此。根据 M 理论，引力子是闭弦，所以引力子必须要能在整个的完整空间中传播，也就是说要能在体空间中传播。ADD 思想的关键在



于：我们以前一直做的都只是试图用标准模型粒子探索额外维度。

我们在默认了强相互作用与电弱相互作用可以在整个十一维空间中存在的条件之后，在第六章中论证了当代最新的实验已经为额外维度设置了一个上限—— $10^{-18}$  米。但是，如果标准模型被局限于膜上，那么就只有引力相互作用才能感受到额外维度的存在，这样我们就有了一幅完全不同的物理图像（图 127）。我们并没有像研究其他基本相互作用那样细致入微地研究过引力相互作用。引力太弱以至于很难精确检测。于是问题就出来了：如果只有引力才能知道额外维度的存在，那我们一直没看到的额外维度可能有多大？

251

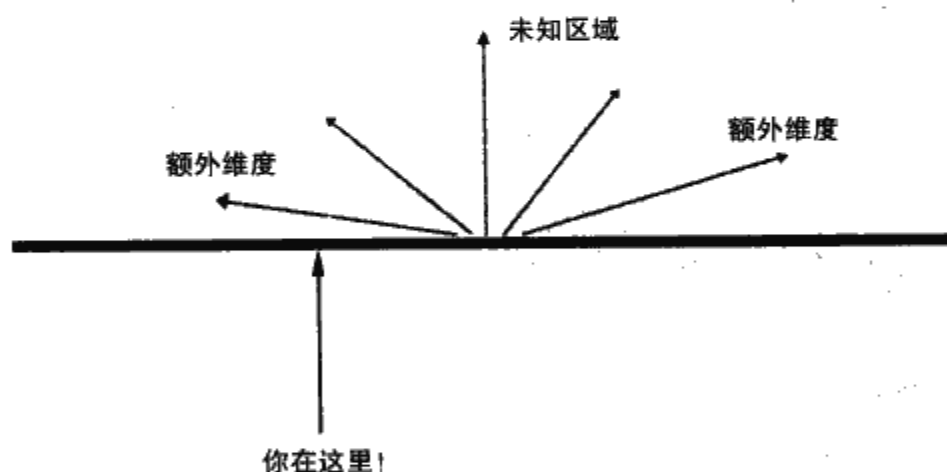


图 127 在阿卡尼-哈密德、迪莫普洛斯与德瓦利发展出来的物理图像中，所有已知物理以及所有我们认为我们已经知道的物理，都被局限于宇宙的一个薄片上。远离这个薄片的所有一切都是未知领域！

在 1998 年的论文中，ADD 给了该问题一个引人注目的回答：额外维度可能大到 1 毫米！即使在这样的情况下，仍然不



## 在小尺度上修改引力

假定除了普通的三维空间之外，还有一个蜷曲到半径为  $R$  的环上的额外维度存在。我们讨论一下一个点质量产生的引力场。

在比  $R$  大的距离上，起始于质量点的引力场线在正常的三维空间中均匀地向外延伸。以质量点为中心的球壳表面积按与中心距离的平方关系增加，引力按同样的变化率减弱。在很大的距离  $r$  上，引力变为  $1/r^2$ 。这就是引力的牛顿平方反比律（图 128），在大尺度上这个关系已经被普遍验证过（我们知道这个关系在计算太阳系的轨道时非常成功）。平方反比律是三维空间宇宙的一个直接结论。那么在  $r$  小于  $R$  的距离上这个关系还成立吗？

在接近于质量点的尺度上，第四个额外维度的大小已经可以与普通的三个空间维度大小相提并论，因此力场线在四维空间中均匀地延展开来。所以在接近于中心的这个区域上，引力遵循的是立方反比律，也就是正比于  $1/r^3$ 。因此随着与中心位置间距离的变大，引力比平方反比律时变弱得更快一些。同样的，接近中心位置时，

引力也会以比我们熟悉的速率更快地增强。这也就意味着，短距离上的引力，比我们以前认为的更强。如果有  $n$  个蜷曲到半径  $R$  的额外维度存在，那么在小于  $R$  的区域引力将遵循

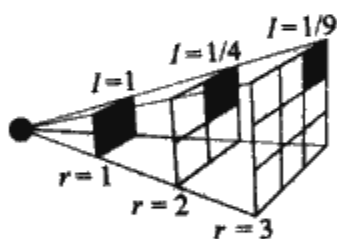


图 128 平方反比律。某个质量  $m$  所产生的引力  $I$  随着  $r$  距离的增加而平方减少



$1/r^{n+2}$  律。而在我们日常生活的极大距离上，我们会欣喜地发现熟知的牛顿平方反比律没有任何变化；月亮还在按照牛顿轨道稳定地转动，对额外维的存在一无所知。但是在很小的尺度上，引力就会急剧变强。

254

大额外维度 ADD 理论的妙处并不仅仅是有趣又明晰，更在于它允许实验物理学家们立即着手探测引力与其他力之间的统一。人们从不曾想到过会有这样的可能性；一百多年来人们一直相信引力天生就要弱于其他的力。比如，两个电子之间的引力比静电排斥力小大约  $10^{43}$  倍。现代物理学中，人们经常使用下面的术语表达引力之弱：大自然中存在两个基本能量标度——电磁相互作用与弱相互作用统一到一起的电弱标度（大约 1 TeV，或者说  $10^{-19}$  米）；以及引力相互作用与其他的相互作用统一到一起的普朗克标度（大约  $10^{16}$  TeV，或者说  $10^{-35}$  米）。引力的微弱意味着，如果我们想探测到所有力的统一的话，那么我们将需要相当大的能量——远远超过了我们现代的加速器可能提供的能量。

人们早就知道引力是极端微弱的，可是一直没人能解释引力为什么这么弱。我们怎样才能解释大自然中的两个基本能量标度竟相差一个  $10^{16}$  的因子呢？看来只能寄希望于量子效应来将电弱能标推到普朗克能标。这就是糟糕的等级问题了，我们在第五章（第 179 页）中曾讨论过这一问题的另一个版本。从很多方面来看，寻找等级问题的破解之道一直以来都是现代高能物理向前发展的一个重要动力。我们知道，标准模型在其自身的框架内无法解释这种量级上的差异性。因此只好使用精细

调节参数的办法来保证理论可以与电弱能量标度上的物理观测保持一致。

理论上，解决等级问题的最好办法是在 TeV 能区修改标准模型。引入超对称的话，我们就可以稳定电弱能标并且使其自然地远离普朗克能标。到目前为止我们所有的讨论都以对称性为核心，而 ADD 则提出了无须求助于对称性即可解决问题的办法，新的想法就是利用几何。ADD 建议，不要用超对称来修改 TeV 能区的标准模型；因为额外维度的出现会改变普朗克能标本身。如果大额外维度真的改变了牛顿定律，那么在比  $10^{-35}$ ——普朗克长度——大很多的尺度上，引力就可以达到普朗克强度。事实上，如果真的存在足够多且尺度上又足够大的额外维度，那么我们完全可以将普朗克能标一路带到电弱能标，等级问题自动就会消失了！在这一物理图像中，大自然就只有一个基本能标：1 TeV 大小的电弱能标。

对于给定的额外维度数目，如果要求引力在 TeV 时与其他的力一样强，那么人们可以计算出额外维度的大小应该是多少。当只有一个额外维度存在的时候，这个额外维度半径必须有  $10^8$  千米。我们立即就可以排除这种可能性，因为  $10^8$  千米几乎相当于地球到太阳的距离了，而我们知道在这个距离上，引力遵循的却是平方反比律，而不是一个额外维度所要求的立方反比律。两个额外维度的时候，大小约为 1 毫米。1998 年，ADD 刚刚发表他们的论文时，引力实验还没有检测过这样小的距离。所以人们完全有理由猜测引力在亚毫米量级遵循四次方反比律。于是 ADD 就可以不必求助于超对称便解决了等级问题。当然前提是标准模型粒子被限制在 3-膜上，只有引力

255



可以感受到两个额外的毫米大小的维度。对于更大数目的额外维度理论，出于解决等级问题的需要，其尺度将更小。M 理论允许的最大额外空间维数为七，此时计算出来的额外维半径是  $10^{-14}$  米。虽然乍看之下好似一个极小的长度，但比起粒子物理学中的常见尺寸已经大多了；事实上，这不过是一个很大的原子核尺寸。

尽管 ADD 学说看起来并未破坏已知物理学，但其与超出标准模型的各种猜想关系如何呢？是否能与前几章中讨论过的各种新想法和谐共存呢？比如，ADD 学说与大统一关系如何呢？我们在前面看到在超对称大统一理论中，耦合常数收敛于  $10^{16}$  GeV，这相当于说大统一理论中所有的规范力统一起来。尽管超对称大统一理论至今未能实验证实，但是几条理论上的成功——比如正确地预言了标准模型中的某个关键参数——使得人们在某种程度上相信这一理论的正确性。而且，由于其统一能标足够高，也就不存在未观测到质子的衰变问题。但是如果量子引力才是一个 TeV 能区的正确理论，那么就不会发生各种力的统一，我们是不是就得在 ADD 图景中放弃大统一理论的所有好处呢？

就在 ADD 发表他们的论文不久之后，CERN 的三位物理学家凯斯·迪恩尼斯 (Keith Dienes)，艾米利恩·杜达斯 (Emilian Dudas) 与汤尼·戈尔菲塔 (Tony Gherghetta) 证明：在规范力可以感受到某几个额外维度的前提下（但不能感受到大的额外维度，只有引力才能在大的额外维中传播），大统一可以发生在 TeV 能区。不过，其理论很难精确计算；在普通的四维量子场论中之所以发生大统一看似具有一定侥幸因

素。伊格内提奥斯·安东尼亚迪斯与巴黎高等师范学校的康斯坦丁·巴卡斯 (Constantin Bachas) 一同发展了一套取决于体空间性质的方法。他们的方法看似允许 TeV 能区的大统一，并且可以同时解释标准方法的成功原因。尽管这一领域目前还很不完善，有很多亟待探讨的问题，但至少意味着在 ADD 方案中实现大统一还是有可能的。

大额外维学说内涵极其丰富。我们已经看到它是如何解决等级问题。下面补充性文字“大额外维度与丢失的物质”讨论了大额外维学说的另一个用武之地：暗物质问题。事实上，稍微发挥一下灵活性，我们就可以用大额外维学说解决很多著名的

## 大额外维度与丢失的物质

256

现代物理学的一个未解之谜是所谓的暗物质问题。观测表明，宇宙中的大部分物质都是以暗物质的形式存在。暗物质指的是我们看不到，但根据其对可见物质的引力相互作用，我们知道它们的存在的那些物质。(星系团簇的速度太大，单用团簇内可见物质的引力效应解释不了。更准确地说，旋转曲线——旋转曲线指的是转动速率随着与旋涡星云中心距离的变化而变化的规律——强烈地显示出星系中不可见物质的存在。)

很多粒子都可以充当宇宙中暗物质的候选者。我们在第五章中曾经看到，一些标准模型的扩充模型能够提出一些解决办法；例如，暗物质有可能是 LSP——最轻的超对称粒子。尽管人们可以提出一些可能性，但是没人真的确定暗物质到底是由什么组成的。



对这个问题，ADD 学说提出了一条完全不同的解决之道：暗物质可能是存在于不同的膜上——或者说与我们的宇宙间隔很小距离，比如 0.1 毫米的平行宇宙上——的普通物质。这里指的平行宇宙可不是各种各样的科幻小说中提到的平行宇宙；那种所有的一切都与我們一样，只不过第二次世界大战的战胜方成了希特勒，又或者约翰·肯尼迪未被刺杀的平行宇宙只出现在科幻小说中（当然如果存在无数种平行宇宙的可能性，这种异想天开的情况也要考虑一下）。而我们这里要说的平行宇宙就是像它的字面意思那样，就像这一页与书中的另一页是平行的，只不过我们所说的是物理理论中的平行，意思推广了一下而已。那片与我们的膜平行的膜上可能也有我们所说的标准模型中的那些粒子，当然也可能有其他一些我们未曾见识过的力，甚至连维度都可能与我们的不同。我们不管那个另外的膜，或者说另外的宇宙中到底有些什么样的力，也不管那个平行宇宙中有哪些是暗物质——不管是光子还是类似于光子的其他什么粒子。我们只知道那个宇宙中的“平行物质”可以与我们的宇宙通过引力而相互作用。别忘了引力可以自由地来往于不同的膜之间。

关于暗物质的另一个解释是我们的宇宙在额外维度中折叠起来。某个星系在额外维中可能距离我们只有几分之一毫米，而在光能够传播的维度中可能距离我们就有几十亿光年。比方说一个星系距离我们足有  $10^{16}$  光年，这样的话那里的光在大爆炸之后还不曾到过地球。但是那个星系却可以通过引力相互作用影响到我们，因为在额外维中，这个星系距离我们只有不到 1 毫米的距离。于是就成了“普通”物质与星系团簇之间的引



力相互作用；但对我们来说，那就是暗物质，因为那个星系所发出来的光还没能到达地球呢。

——《科学美国人》1990年11月，第377页

## 探索更高的维度

257

在人类的认识之外存在着第五维……

这是想象之维。

罗德·塞林 (Rod Serling)，

《阴阳魔界》(*The Twilight Zone*)

ADD 思想最吸引人的一点是统一发生在 TeV 能区。如果 ADD 真是正确的，那么我们很快就可以检验那些一度被认为存在于不可触及的  $10^{16}$  GeV 的普朗克能标的想法。我们至少有三种检测这些思想的方法：天文学观测，桌面上的引力实验以及粒子加速器。

### 额外维度的天文学检验

通过前面的章节，我们已经知道了天文学上的观测是如何为大额外维度的数目提供了一个宽松的限制。如果我们真想用额外维度来解决等级问题，那么太阳系的观测告诉我们，大额外维度的数目至少要多于一（如果只有一个大额外维度存在，那么它将足有  $10^8$  千米大，而我们知道行星轨道遵循牛顿的引力定律，所以只有一个额外维度的假定直接就被排除掉了）。也就是说，至少要有两个大的额外维度；II 型超新星的观测与



理论模拟（见补充性文字“Ⅱ型超新星”）表明至少要有三个大额外维度。

天文学家们现在都用计算机模拟Ⅱ型超新星事例，很明显中微子将带走爆发所产生的大量能量。超新星爆发将放射出数目巨大的中微子——典型事例中的这个数目大约为  $10^{57}$ 。这是 ADD 学说所面临的一个问题。

之所以有这样的原因是因为：ADD 模型中，引力子与物质之间的相互作用比传统理论中的更强；这是因为短距离上的引力变得更强了。另一方面，这就意味着 ADD 模型中的高能碰撞将比传统理论中产生更多的引力子。这些引力子产生后，可以在所有的空间维度中自由移动；它们可以将能量从我们的膜上移到体空间中。那么这有什么问题呢？问题就是如果超新星向体空间中释放过多的能量，那么超新星就会像受潮的鞭炮一样；但是超新星常常是非常明亮的，甚至相隔半个宇宙的距离我们还能看见。我们知道Ⅱ型超新星中的大部分能量是通过中微子传递的。剩下给引力子传递到体空间的只能是很少的一部分。因此，超新星的观测限制了引力子与物质之间的耦合强度。在只有两个大额外维度的情况下，普朗克能标不可能小于 50 TeV。如果我们想用 ADD 思想解决等级问题，将普朗克能标带到 1 TeV 附近，那么至少要有三个大额外维度（因为相互作用发生在更短的距离尺度上，大额外维度的数目越多，引力子与物质之间的耦合就越弱，如果有四个或更多个额外维度，ADD 学说就会逃过所有来自超新星观测的限制）。

## II 型超新星

出现在大麦哲伦星云的超新星 SN1987A (图 129) 距离地球大约 17 万光年。这么近的距离使得天文学家可以仔细地对其进行观测。像 SN1987A 这样的超新星产生于重质量星体耗尽其核燃料的时候。高质量的星体很快就会耗尽自己的氢原料, 然后就只能通过日益增多的重元素参与的一系列核反应发光: 碳原子核与氧原子核聚合成氖原子核与镁原子核; 硅原子核与硫原子核聚合成铁原子核。在其生命晚期, 高质量星体的内部就像洋葱的分层结构一般。当一个星体中发展出铁核的时

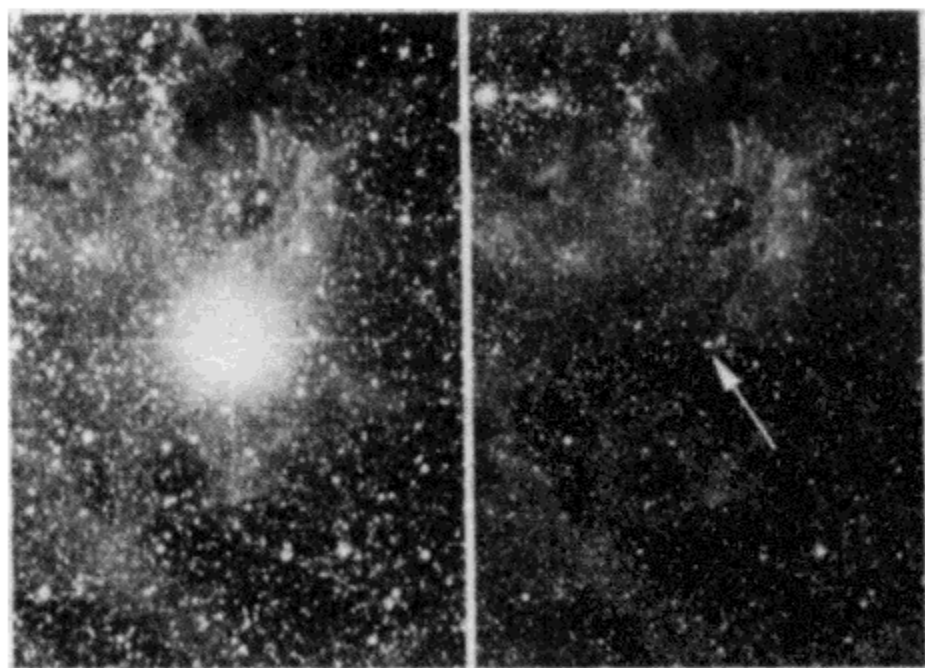


图 129 蓝色超巨星 Sanduleak - 69°202 (右图箭头所指), 在其生命的大部分时间里, 质量为太阳质量的 15~18 倍。1989 年 2 月 23 日, 地球上的望远镜观测到这颗星体发生超新星爆发 (左边的图中是相同的区域; 注意一颗星的爆发照亮了区域内所有的星)。天文学家中用著名的新名字——SN1987A 命名它



候，它便注定走向毁灭。任何有铁参与的核反应都将吸收能量，所以燃料供应就会耗尽。如果星体核心不能再产生能量，则星体将无法再抵御其自身引力的无情毁灭。当核心大部分已经是铁的时候，灾难发生了：核心在其自身引力的作用下开始崩塌。在十分之一秒内，内核崩塌成一个很大的中子，于是就成了中子星。在这个过程中产生了数目惊人的中微子。内核的收缩太过迅速以至于“行动太过火”，瞬间便变得比原子核更加致密。这个时候，核力就会使内核变得很强硬并阻止进一步的崩塌（如果内核不太重的话）。内核会反弹回来，就好像你在手中捏着一个橡皮球，捏得太紧，球就会向外弹。同时，外层的核仍在向内崩塌。内核的向外反弹与外核的向内塌缩合在一起，一场大爆炸不可避免。30%~50%的星体质量被射到宇宙空间中；残留物就是中子星（如果核心质量足够大的话，就形成了一个黑洞）。

宇宙学也会对 ADD 学说提供一些限制。当我们将目光投向宇宙深处，我们看到的是一个年轻的宇宙，而不是我们今天的宇宙。宇宙学家们现在有了一个成功的宇宙演化模型，详细地描述了从大爆炸之后几分之一秒时小而热的宇宙到今天处于大而冰冷的状态的宇宙的演化过程。在宇宙学的标准模型中。宇宙由于膨胀而逐渐冷却。这样的物理图像同大量的观测事实相符合。但是，如果宇宙是膜的话，那么它就不只因为膨胀而冷却，还将因为引力子将宇宙的能量带离膜空间中而冷却。就像一块热烫的煤放射出光子，而光子带走了能量，所以煤逐渐冷却；而我们的宇宙放射出来的是引力子，引力子带走了能量

从而使宇宙降温。但是宇宙学的标准模型告诉我们这个效应的影响碰巧还不到需要考虑的地步。不过引力子放射到体空间还会引起另外一个问题：某些这样的引力子可能会返回膜，这时它们将放出大量的光子，但天文学家们从未观测到这样的信号。

## 新一代宇宙线探测器

部分由于要解决极高能量宇宙线的起源问题，天文学家们正在发展新一代宇宙线天文台。

当一个具有  $10^8$  TeV 能量的宇宙线粒子撞入大气层的时候，将会制造一场二级粒子雨，这场二级粒子雨到达地球表面的时候将覆盖 16 平方千米的面积。因此，为了完整地分析这场大粒子雨，天文学家需要覆盖面积巨大的天文台。

坐落于阿根廷的皮埃尔·奥杰 (Pierre Auger, 图 130) 宇宙线天文台 (图 131) 由 30 个荧光望远镜组成，这些荧光望远镜监测覆盖面积达 3000 平方千米——比纽约面积还大 3.5 倍——的 1600 个探测站点。在犹他州还将最终建成覆盖北半球的类似天文台。目前为止，本项计划已有来自 16 个国家的 250 多名科学家参与进来。

关于 ADD 学说的另一种完全不同的检测来自于宇宙线研究。每秒钟，单位平方米上都会有上百个 GeV 能量的宇宙线粒子进入地球大气层；这样的能量并不是很高。但是平均说来，每星期每平方千米的面积上就会有一个  $10^6$  TeV 能量的宇宙线粒子。这样一来，就可以算作是远远超过粒子加速器的高



图 130 1938 年，皮埃尔·奥杰发现了“广延空气簇射”——宇宙线中的初级高能粒子与大气层碰撞导致的二级粒子簇射。随后他推断宇宙线粒子中具有的能量至少是  $10^6$  GeV，这在当时比能从粒子加速器上得到的能量大 100 万倍。几十年来，粒子加速器上能提供的能量早已远非当日可比；但是人们从宇宙线粒子探测到的能量也已今非昔比。高能宇宙线中的能量仍然比实验室中可以产生出来的能量大很多。奥杰相信极高能宇宙线的研究将对物理学非常重要——虽然他无论如何不会想到这样的研究也许会使我们窥到额外维度的影子！皮埃尔·奥杰宇宙线天文台的名称就是为了纪念他的贡献

能事例了。而每个世纪，每平方千米的面积上就会有一个  $10^8$  TeV 能量的宇宙线粒子。这样高能量的宇宙线粒子不是我们

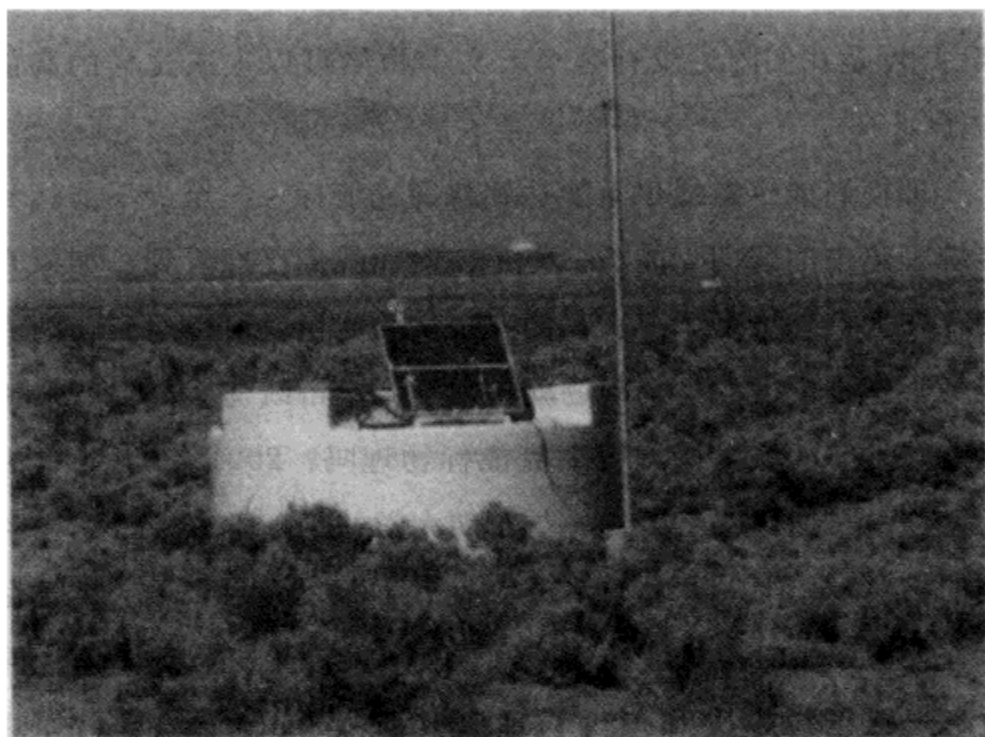


图 131 这张照片是皮埃尔·奥杰宇宙线天文台的一个宇宙线探测器。这些探测器中盛装着 3000 加仑的水。这些大型水罐的里面漆黑一片，只有当宇宙线簇中的某个粒子进入时才会闪亮一下。粒子以切伦科夫辐射的形式发光，这些光可以被探测到并可测量其有关性质。阿根廷帕姆帕·阿玛雷拉 (Pampa Amarilla) 沙漠上遍布着 1600 个这样的探测器，横跨 3000 平方千米的面积，每个探测器之间间隔 1.5 千米。美国的犹他州建有类似的天文台。这些探测器将为我们获得造成粒子簇的极高能宇宙线的有关信息

在实验室中能产生出来的。这些极高能粒子的起源一直是一个谜，因为它们必定起源于离我们很近的地方。（它们的起源之地离地球必须要小于 1.8 亿光年；远距离传播时，与宇宙微波背景的碰撞会导致能量损失。尽管在我们看来，1.8 亿光年长



的不可想象；但是在天文尺度上来看，这并不是一段很长的距离。）可是我们附近没有哪个天文学物体可以生成这样的高能粒子。

即使高能宇宙线也不能达到普朗克能标——至少不能达到传统理论中的普朗克能标。但是在前面我们已经看到，如果真的存在大额外维度，那么只要有很少的能量就可以达到普朗克能标。于是下面的这个问题就出现了：宇宙线与大气层的碰撞可能有足够的能量探索普朗克能标物理吗？2001年，ADD中  
261 的一位——迪莫普洛斯——与布朗大学的物理学家格雷戈·兰兹伯格（Greg Landsberg）一起证明了如果大的额外维度存在，大型强子对撞机上的高能实验就可能产生出微观黑洞。同时，圣巴巴拉卡夫利理论物理研究所（Santa Barbara Kavli Institute for Theoretical Physics）的斯蒂芬·吉丁兹（Steven Giddings）与斯科特·托马斯（Scott Thomas）也得到了相同的结果。几个月之后，加利福尼亚大学欧文分校的乔纳森·冯（Jonathan Feng）与肯塔基大学的欧文和阿尔弗莱德·夏皮尔（Alfred Shapere）指出，如果大型强子对撞机上可以产生微观黑洞，那么某些宇宙线中也当然有足以产生微观黑洞的能量。事实上，就在你读这本书的时候，地球上空某处的大气层中可能就产生了一个黑洞。

## 额外维度与高能宇宙线

ADD学说解放了物理学家们的想象力，使他们趋向更加狂野的想象。现在物理学家们常常提出一些看似疯狂的解决办



法。比如，我们在前面提到了神秘的高能宇宙线。其神秘之处在于这些高能宇宙线粒子的起源之处距离地球不能超过 1.8 亿光年。但是，将宇宙线粒子加速到这样高的能量极端困难；即使人们能够发现某种加速机制可以做到这一点，天文学的观测也告诉我们，在 1.8 亿光年以内似乎没有这种可以将宇宙线粒子**加速**到如此高能量的天文学物体。在 ADD 物理图景中，我们可以重新解释这些高能宇宙线粒子。假设某处的宇宙线相互作用产生了一个黑洞，这个黑洞产生之后便进入了体空间（事实上，所有的黑洞差不多都应该留在膜上，因为它们可能具有电荷或者色荷，又或者轻子数——标准模型性质必须局限于膜上。但是在某些方案中黑洞可以进入体空间中；例如，膜上产生的引力子进入到体空间后变成黑洞）。在某些模型中黑洞离膜很近，在那里继续增加质量同时尺寸也随之慢慢增大。一旦达到普朗克质量 ( $10^{16}$  TeV)，黑洞的视界就会变得太大以至于能够触到膜；黑洞的视界将在膜上蒸发，进入到膜中的典型粒子能量为  $10^{15}$  TeV。在这种物理图像下，这些黑洞的残余物将**减速**到  $10^{10}$  TeV（这可比将一个粒子加速到  $10^{10}$  TeV 容易多了），然后就成为了我们以前没弄清楚的极高能宇宙线。当然，上面所有这些还都只是猜想而已——但的确是一种看待这种现象很好的方式。

任何像这样的黑洞很快就会衰变成一场霍金辐射雨（主要变成我们膜上的标准模型粒子，而不是进入到体空间的引力子）。这种辐射雨明显不同于产生自宇宙线质子与大气层原子核碰撞的辐射。因为引力是“味盲”（不参与强相互作用），所



以当一个微观黑洞消失的时候，它产生各种标准模型粒子的几率本质上都是相等的。自旋与色考虑进去后，计算表明黑洞衰变产物中 72% 是夸克与胶子，18% 是轻子，剩余的是玻色子。这样清晰的粒子雨不难观测到。所以皮埃尔·奥杰天文台将有可能观测黑洞。我们在前面的章节中已经看到宇宙线实验是如何在粒子物理学的发展中扮演重要角色的；尽管其重要性已经随着对撞机的发展而日益衰弱，但是现在宇宙线观测再次引起了人们的注意。像奥杰之类的宇宙线天文台将有可能为我们带来标准模型之外的粒子物理那最初的一瞥。（顺便提一下，我们根本不需要担心微观黑洞产生的可能性——它绝对不会伤害到我们。这类黑洞太小，只能存在短短的一瞬间， $10^{-26}$  秒之后便会衰变成霍金辐射。）

另外一些天文方面的观测还可以检验 ADD 学说的其他方面。举例来说，即将出台的新一代引力波探测器有能力探测起源于猛烈的天文学事件的引力波（见补充性文字“新一代引力波探测器”）。而在 ADD 学说体系中的暗物质只是“普通”物质——星星、星系以及类星体，只不过这些普通物质存在于我们宇宙的另一折层。因此人们就可以用这些引力波探测器来探测 ADD 学说中的暗物质。假定临近的折层中发生了一次猛烈的事件，比方说两个中子星碰撞，这样的事件就是强烈的引力波源，可以通过额外维中的捷径立刻传到我们这里，于是 LIGO（激光干涉引力波天文台）以及其他类似的探测器就将记录下相关信号。而利用传统的望远镜则探测不到源于这次碰撞的电磁辐射，因为这些辐射要经过亿万年才能抵达我们的折层。因此只有引力波却没有对应的可见信号的碰撞将是额外维

度的一个信号。

## 新一代引力波探测器

264

名为 LIGO（激光干涉引力波天文台）的一座美国天文台最近投入使用。类似的天文台还有 VIRGO（意大利与法国的合作项目，图 132）和 GEO（德国和英国的合作项目）。日本的 TAMA 项目也正在进行中。世界上还有其他一些处于不同发展阶段的天文台。地球表面很快将出现星罗棋布的引力波探

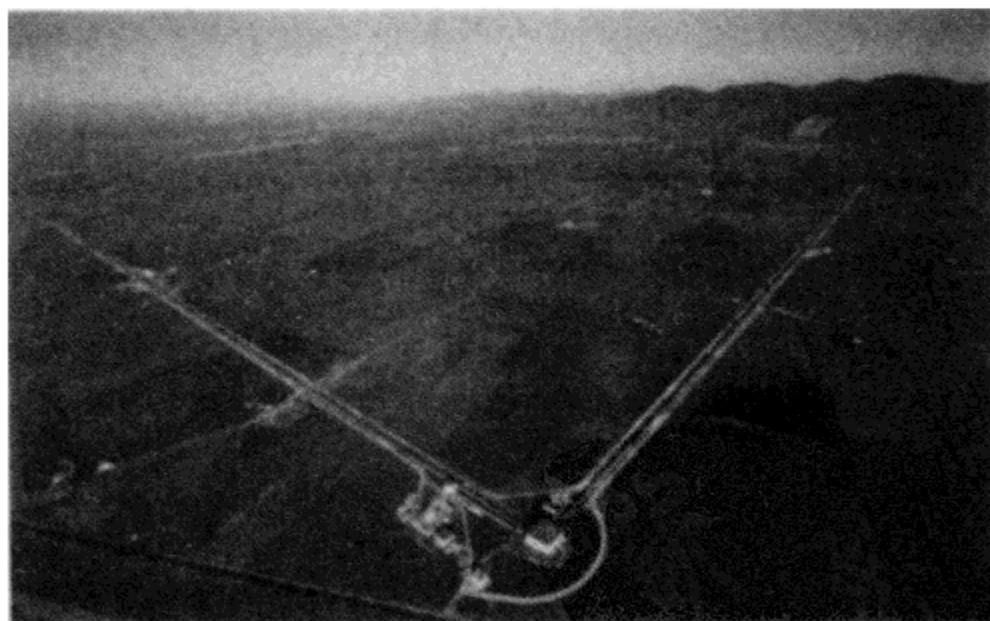


图 132 VIRGO 干涉器坐落于意大利比萨城外几公里处（伽利略就是在比萨做了著名的引力实验）。干涉器长达三公里的两翼在这张航空照片上清晰可见。VIRGO 是一个意大利-法国合作项目。坐落于（汉诺威）附近的 GEO 是一个德国-英国合作项目，其设计与 VIRGO 类似。其他著名的引力波探测器包括美国的 LIGO 干涉器以及日本的 TAMA。另外一些探测器仍在设计或建造阶段。引力波研究将是我们认识宇宙的一个新窗口



测器，人类又向宇宙打开了另一扇窗户。

这样的一些探测器可以直接核实引力波的存在并且能够检验引力子是自旋为 2 的无质量粒子的预言。它们也能够确认黑洞的存在并且检验关于两个黑洞碰撞的广义相对论预言。还能带来很多超新星、中子星与星系核方面的知识。这些探测器还能探测大爆炸时期空间和时间出现时所生成的时空波纹。

这些探测器还会带来令人更加兴奋的可能性——尽管看起来还有点远，那就是对引力辐射的分析将提供更高维度存在的证据。

### 桌面上的大额外维度引力检验

既然各种猜想都已经到了天文学的领域里了，那么再回到在桌面上就可以进行实验的现实中似乎无疑于一种轻松的调剂。我们自然也会认为这样的实验——桌面上的引力实验——将会让我们看看额外维度。

在 ADD 最初提出只有引力能感受到大额外维度这一想法时，引力检验的水平只在毫米量级。在这样的尺寸上检验引力的传统方法是使用扭秤。亨利·卡文迪许（Henry Cavendish）曾在 1798 年利用这种工具成功的测出牛顿引力常数，同一装置的变种直到今天还在使用。卡文迪许装置的主要部分是一根用细线悬挂于其中心之上的杆。杆的每一端是一个小铅球。杆可以绕线自由扭动。整套装置非常灵敏，分别置于小铅球两边的两个大铅球产生的微小引力将导致可观测的扭动。但不幸的是，还有其他类型的力可以造成杆的扭动：比如静电力、地板

的振动、气流等。正是因为此类实验难度极大，所以直到1998年，根据平方反比律才检验到毫米量级的引力相互作用。而 ADD 一提出通过测量对平方反比律的偏离来探索更高维度的可能性之后，物理学家们立即着手计划这样的实验。

265

例如，2001年，华盛顿大学的艾瑞克·艾德尔博格（Eric Adelberger）与布雷恩·赫克尔（Blayne Heckel）（图 133）领导的实验组利用做了巨大改进的扭秤实验来测量引力强度，其测量距离一直在不断缩短。这个组的实验（图 134）发现牛顿引力定律直到 0.2 毫米仍然成立。所以额外的 ADD 维度，即使存在的话也应当小于 0.2 毫米。

还有一些其他的实验组利用有所不同的方法测量小尺度上

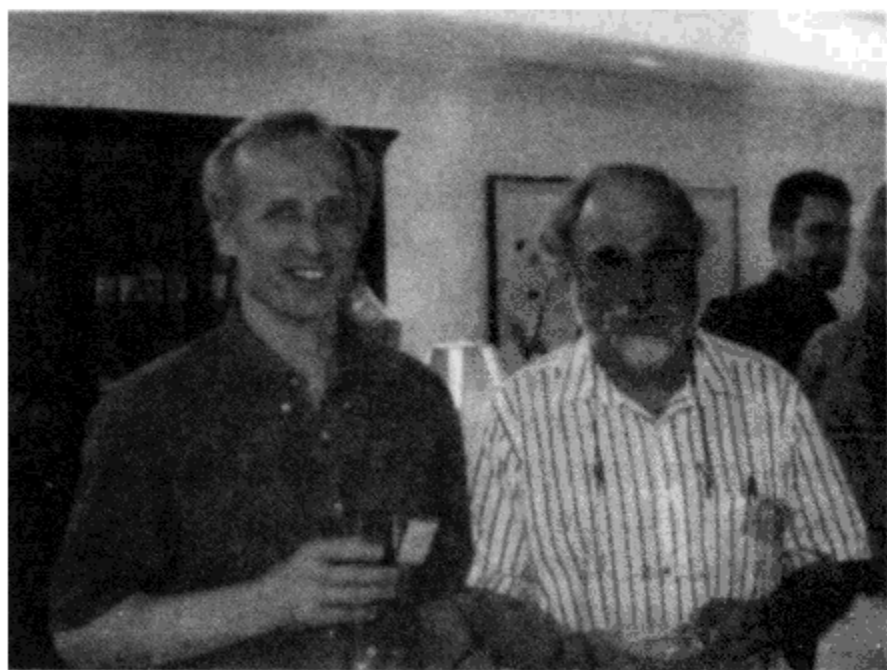


图 133 布雷恩·赫克尔（左侧）与艾瑞克·艾德尔博格（右侧）证明牛顿的引力平方反比律直到 0.2 毫米时仍然成立，说明即使额外维度真的存在，也应当小于 0.2 毫米

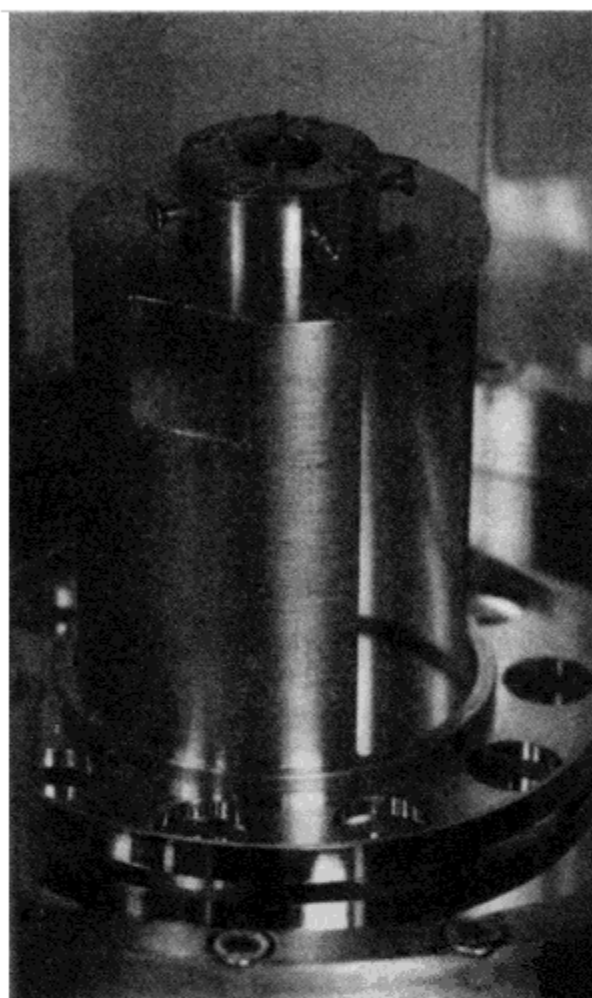


图 134 图中的这一装置（扭摆）可用来寻找额外维度。摆用 20 微米粗的钨纤维（在这张图上几乎看不见）悬起，可以自由转动。摆的上部有一个方镜，用激光照射方镜可以测到摆的任何微小转动。摆的有效元件是一个环，上有 10 个等间距的孔。环的下面是一个由两个圆盘组成的旋转式吸引器，每一个圆盘也有 10 个等距的孔。下边较厚的圆盘与上面的圆盘偏差  $18^\circ$ ，因此下边圆盘的孔处于上边圆盘两孔之间。如果毫米量级上的引力比我们以为的强，则由下边圆盘导致的环的扭转量将不足以消去上边圆盘导致的环的扭转量。吸引器转动时，摆将会受到力的作用，这个力在吸引器转动一圈的时间内变化 10 次。但是假如平方反比律仍然成立，则两个圆盘造成的扭转将精确相消

的引力。例如位于波德（Boulder）的科罗拉多大学有一个实验组，其领导人为约翰·普莱斯（John Price）。这个组测量的是两片长 20 毫米，厚 0.3 毫米的钨片之间的引力。这两片极薄的钨片被置于相隔 0.108 毫米的位置上，其中一片作为“源质量”。“源质量”钨片在第二片“检验质量”钨片的共振频率上开始振动。根据检验质量的振动大小，普莱斯可以计算出两片钨之间的引力是多大——使用的当然是牛顿公式。在本书写作的时候，普莱斯组的结果处于领先，是最短距离上的引力检验，这些引力检验还是未能发现额外维度。（有趣的是，这些结果也可算是某些弦论预言的检验。在某些基于弦论的模型中，伸缩子可以在 0.1 毫米的量级上改变引力；因此普莱斯组的结果排除了这些模型。这意味着，弦论模型的某些方面开始可以检验了！）

266

## 大额外维度的粒子对撞机检验

大额外维度一经提出，高能实验物理学家们就立即检验它。物理学家们仔细地梳理了从 LEP（拆卸以前，一直是正负电子对之间的对撞）或者是 Tevatron（质子与反质子间的对撞）这样的粒子加速器上得到的实验数据，希望能够发现大额外维度的蛛丝马迹。

特别值得一提的是，在 LEP 与 Tevatron 所能达到的能量上，粒子彼此之间靠得极近，故而有产生引力子的可能性。我们一共有两种方法来知晓引力子的存在：一是引力子可以散发到体空间；二是引力子交换过程与标准模型结果干涉。

考虑如图 135 所示的过程。这是一种新的费曼图，其中正



负电子对的碰撞可以产生一个光子和一个引力子。LEP 上有可能发生这样的过程。由于光子是标准模型粒子，因而会被限制在我们的膜上。但是引力子可以自由地在额外维度中徜徉，从我们的膜中带走能量。根据上面的论述，我们有可能观测到这样的现象：一个电子与一个正电子碰撞后只留下一个光子；但是计算一下反应前后的总能量，我们会发现有些能量丢失了。Tevatron 上也可能有类似的情况，只不过参与相互作用的是质子内的夸克而不是正负电子对（想象图 135 中的“e”换成“q”），你可以想象质子与反质子碰撞产生引力子喷柱；同样，碰撞中的能量丢失可以看成是引力子将能量带入体空间的信号。

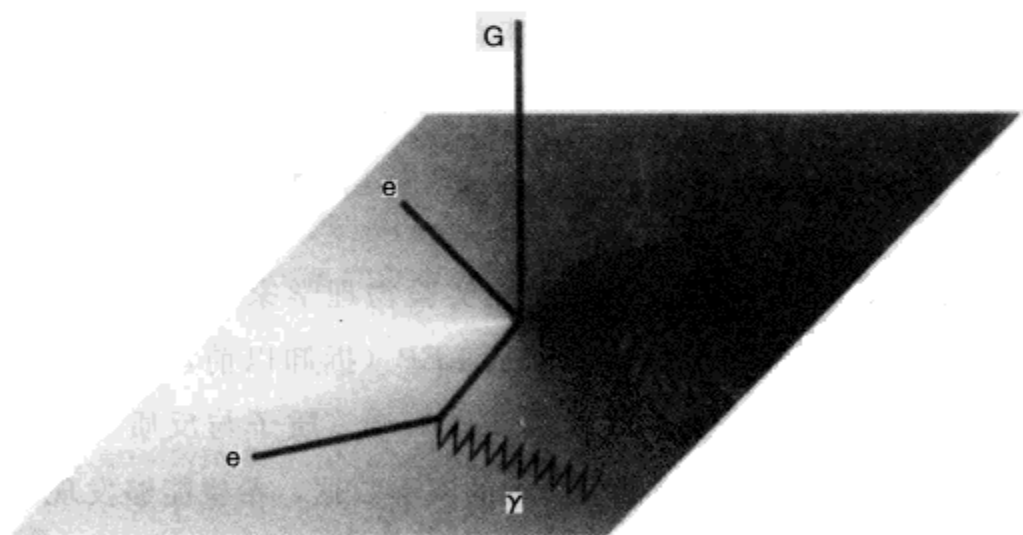


图 135 引力子 (G) 可以进入到体空间中；而电子与光子局限于膜上。研究人员已经在 LEP 数据中寻找过这样的效应，但是毫无结果

当然，说比做要容易得多。实验上寻找丢失的东西极为困难。中微子就是一个例子，中微子可以安全地离开碰撞现场而



不被发现。但是 ADD 模型预言了引力子的产生是如何随着能量增加而变化的，所以如果真的有引力子信号，实验上能够将 ADD 模型的特别信号挑出来。到目前为止，研究人员已经仔细地梳理过 Tevatron 的 Run 1 上生成的数据（采自 1992 年 10 月到 1996 年 2 月的数据），没发现额外维度存在的迹象。同样，研究人员也仔细地分析过截至 2000 年 12 月之前 LEP 上采集的数据，还是一无所获。这项工作仍在继续进行中，即使发现有些信号隐藏在数据背后也毫不奇怪，但在本书写作的时候还未发现引力子发射的信号。

在 Tevatron 与 LEP 上发现额外维证据的第二种可能方式是通过引力子交换过程对标准模型预言的修正间接寻找。举例说明，一个电子与一个正电子通过交换一个虚光子彼此相互作用，这是一个标准的电磁相互作用过程。在 ADD 方案中，一个电子与一个正电子还可以通过交换一个虚引力子相互作用，这个过程对应着另一种费曼图；人们以前计算电子相互作用时未曾考虑过这种费曼图的过程，直到近来由于实验精度的提高才有必要将这样的图考虑进去。于是实验人员又在茫茫数据中寻找与标准模型预言有所偏离的数据，希望从这些数据中发现额外维度存在的数据。不过在本书写作的时候，他们仍然是一无所获。

268

不过我们也不需要泄气。如果一切按计划进行的话，2007 年大型强子对撞机将开始实验。LHC 是将两束非常接近于光速的质子束彼此碰撞。其中的每束能量高达 7 TeV；参与正面对撞的能量比 Tevatron 上能提供的要大很多，而 Tevatron 目前还是全球最强大的粒子加速器。LHC 上的能量当然高到足



以达到额外维度的能量区域——假设 ADD 学说真的正确的话。

除了寻找引力子发射的间接信号外，LHC 还有其他检验 ADD 学说的可能性。LHC 实验的一种可能结果是黑洞的产生。在我们讨论宇宙线的时候曾经提到，兰兹伯格与迪莫普洛斯指出，如果大额外维度存在的话，LHC 上就有可能成为一个黑洞工厂；吉丁兹与托马斯也独立发现了这一点。LHC 上可能每秒钟就会产生出来一个黑洞。LHC 上那些教堂般大的探测器很容易就能从黑洞的瞬间衰变中发现霍金辐射的爆发。不过这同物理学家们设计这座机器的初衷相去甚远：他们本意是要探索越来越小距离上的物理，而不是额外维度。

LHC 上有可能出现的另一个大额外维信号是弦的激发态。我们知道，在传统的弦论中我们熟知的那些粒子——电子、夸克、光子等——都是弦的基本振动模式。通常认为弦的长度为  $10^{-35}$  米，但是如果 ADD 方案正确，那么弦可以更长一些——大约  $10^{-19}$  米，这样的话 LHC 有可能将基本模式的弦“推”到不同的振动模式。如果真是这样，我们就会看到许多奇特的粒子，比如熟悉的电子、夸克、光子等的高质量版本。前景一片乐观。

当然还有其他的可能性，无疑还有些物理学家们未曾想到的额外维信号。如果我们真的生活在膜上，而且如果真的有额外维存在，那么膜就会在这些额外维中有波动。量子力学原理要求这种波动以量子粒子的形式展现出来，对应的量子粒子就是膜子。这些新添的假想粒子预言集中的粒子为标量粒子（自旋为 0）。其质量取决于额外维度蜷曲起来的方式（如果额外

维度是平的，则膜子无质量）。物理学家们已经开始从 LEP 数据中寻找膜子与标准模型粒子相互作用的事例，但目前还未成功。我们需要再次指出，LHC 的巨大能量使其有能力生成膜子，所以我们通过实验寻找它们。

如果 LHC 没有发现引力子的实验证据，如果 LHC 既没产生黑洞也没产生弦的激发态，更没产生膜子，那么 ADD 学说就会受到很强的限制，这些非常强的限制也许会将 ADD 学说完全否定。

## 为什么两个膜比一个更好：兰德尔-山德拉姆方案

我的主呀，您的主张容易检验。

您说我有第三个维度，您称之为“高”，

那么维度意味着方向与测量。

如果真能测量我的“高度”或者我的“高度”在某个方向延伸，

那我将成为您的皈依者。

艾德温·A·艾伯特 (Edwin A. Abbott)，

《平地》(Flatland)

从实验的观点来看，ADD 学说极其丰富：几十年来第一次，人们看到了寻找全新的基本物理的可能性。但从理论观点来看，大额外维度思想存在一个问题。

发展 ADD 学说的首要动机就是要解决等级问题——关于引力为什么如此之弱的问题；换言之就是普朗克能标比电弱能标大了 16 个量级这个麻烦的事实。但是 ADD 学说的解决之道



是提出有某些比自然紧致标度大数个量级的额外维度存在，而且这些大的额外维度的数目尚未弄清。我们已经看到，如果只有一个大的额外维度，那么其半径需为  $10^{11}$  米才能解决等级问题；如果存在七个大的额外维度，那么其半径需为  $10^{-14}$  米才能解决等级问题。即使是后一个值也要比自然假设的紧致半径—— $10^{-35}$  米的普朗克能标——大很多。要是大的额外维度真的存在并能在 TeV 能量区域上产生可观测的效应，那么实验工作者当然感觉不错，可是我们还是要问为什么紧致维度比以前认为的大这么多。从某种意义上讲，ADD 方案只是用一种等级问题（电弱标度与紧致标度之间的等级问题）代替了另一种等级问题（电弱能标与普朗克能标之间的等级问题）。在这种意义上，ADD 方案根本没有解决等级问题，它只是将问题换了种表达形式而已。

ADD 的文章出来几个月后，当时在普林斯顿大学的莉萨·兰德尔（Lisa Randall，图 136）与当时在波士顿大学的拉曼·山德拉姆（Raman Sundrum，图 137）发展出了一套能以更优美的方式解决等级问题的理论。在他们的理论中，只有一个额外维度存在即可，而不像 ADD 方案那样至少需要两个大额外维度；甚至在他们的理论的某些版本中，紧致化都不需要了：额外维度可以无限大！

兰德尔和山德拉姆指出，既然膜带有能量，那么根据广义相对论，嵌入到体空间中的膜会使其周围的体空间蜷曲起来。假定存在一个 3-膜——称为普朗克膜，并且这个 3-膜嵌入到一个额外空间维度的时空中。恰当的构造理论，普朗克膜可以将额外的维度蜷曲起来，这样引力就会离膜很近。也就是

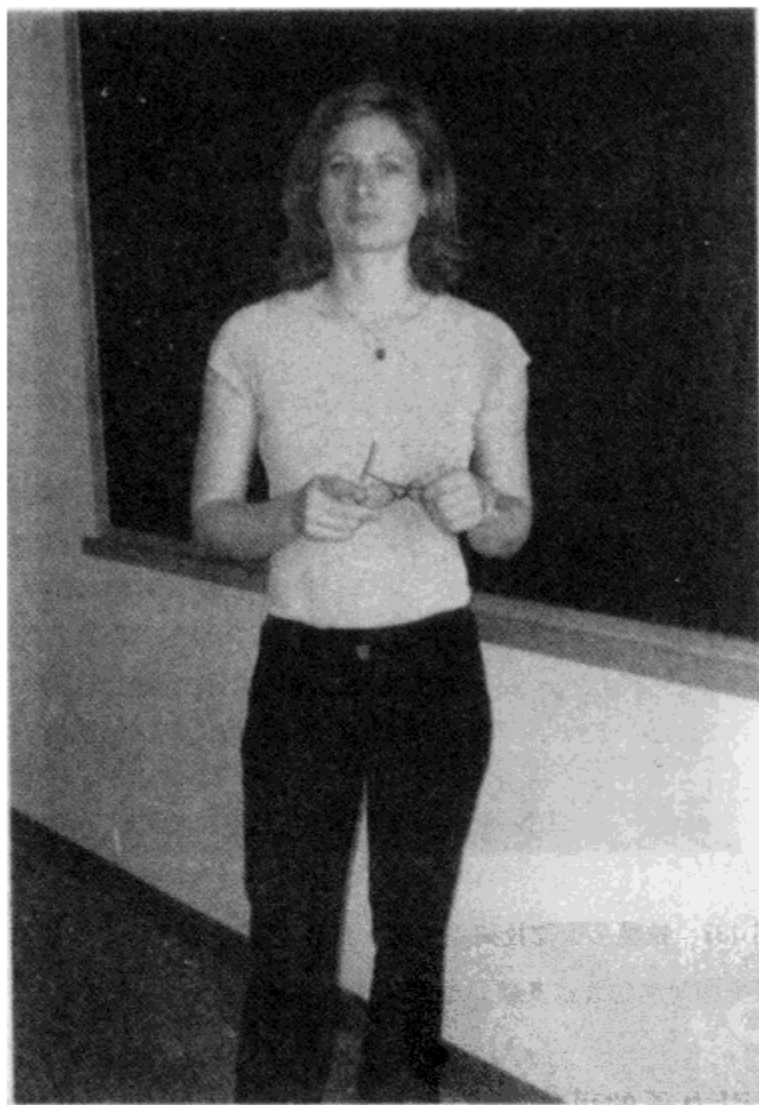


图 136 莉萨·兰德尔是哈佛大学的物理学教授。除了在额外维度领域的工作，兰德尔还研究其他诸如超对称之类的标准模型之外的新物理

说，额外维度有一个“蜷曲因子”[千万别与《星际旅行》(*Star Trek*，美国经典剧集，有很多电影版)中的蜷曲因子弄混了]。本质上，蜷曲因子意味着在额外维度中的任意一个点

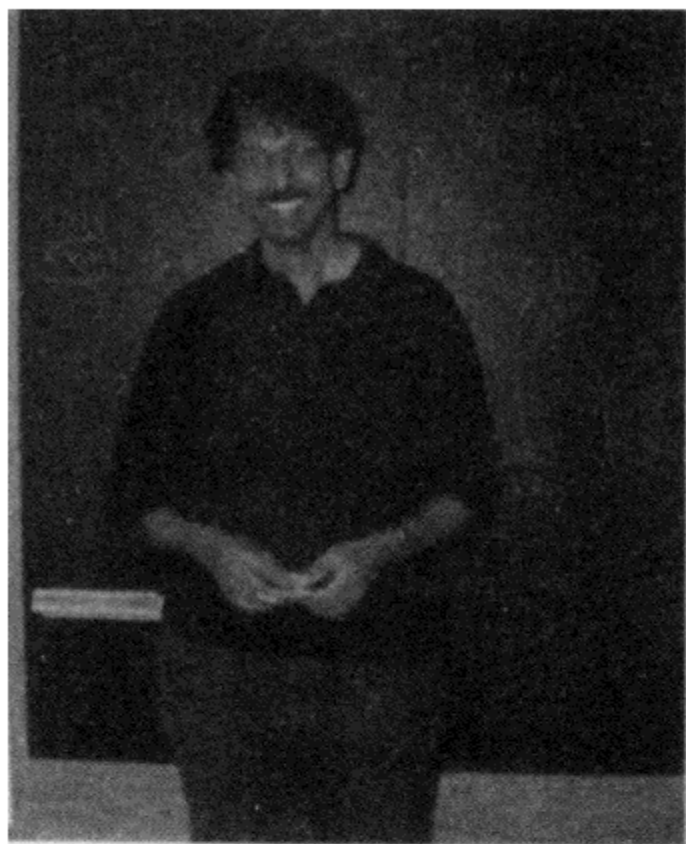


图 137 拉曼·山德拉姆是约翰·霍普金斯大学的物理学教授。他主要研究超对称物理以及额外维度物理的可观测效应

都有发现引力子的可能性。兰德尔-山德拉姆理论中的蜷曲因子使得在离膜很近的位置发现引力子几率很大——所以那里的引力很强。事实上，那里的引力可以同其他的力一样的强。但当我们在额外维度上离开膜时，发现引力子的几率将成指数衰减，也就是说当你离开膜的时候引力将成指数衰减。因为膜上引力很强，所以那里的粒子非常的重；但是当一个粒子在额外维度中离开膜的时候，这个粒子就会迅速变轻。注意，即使理论上额外维度无限大而且引力可以在所有的维度中自由传播，

但在实际上引力还是被局限在膜上。因此不需要将额外维度蜷曲起来，因为引力只能在额外维度中传播很小的距离，所以看起来空间的额外维度蜷曲起来了。

现在我们再向这幅物理图景中加入另外一个膜。这个新加入的膜——称为 **TeV 膜**——与原始的普朗克膜平行并且在额外维——第五维——上相去不远。标准模型粒子正是存在于这个膜上。也就是说 TeV 膜就是我们生活于其中的膜。TeV 膜上的引力很弱，因为蜷曲因子已经将离开普朗克膜的引力“稀释”了。在这一方案中，等级问题与各种能标之间的巨大鸿沟或者不能确定数目的大额外维度都没有关系。引起等级问题的只是两个 3-膜在五维时空中的相对位置。如果我们的 TeV 膜与普朗克膜很接近（指在额外维度中），则我们就会测得很强的引力作用；如果我们的 TeV 膜与普朗克膜离得远一些，引力就会比我们测得的还弱（图 138）。用这种方法解决等级问题比其他方法更自然一些。在等级问题的最初形式中，两个能量标度之间的比率是  $10^{16}$ ；在兰德尔-山德拉姆方案中，恰当地选取单位后，两个膜之间的“距离”在 10 这个量级上。显然，10 要比  $10^{16}$  自然得多。

兰德尔-山德拉姆 (RS) 理论中包含一种可以解出爱因斯坦方程的特殊几何。3-膜嵌入在一个具有负常数曲率的五维时空中——反德·西特时空  $AdS_5$ 。这个  $AdS_5$  时空本身就很有意思，当然这是因为它在马德西纳证明引力与量子场论对应的工作中起中心作用。兰德尔-山德拉姆方案与 M 理论中出现的哈罗瓦-威滕时空很类似。于是我们很自然地就会想到 M 理论与兰德尔-山德拉姆方案有着天然的联系。这里我们再强调

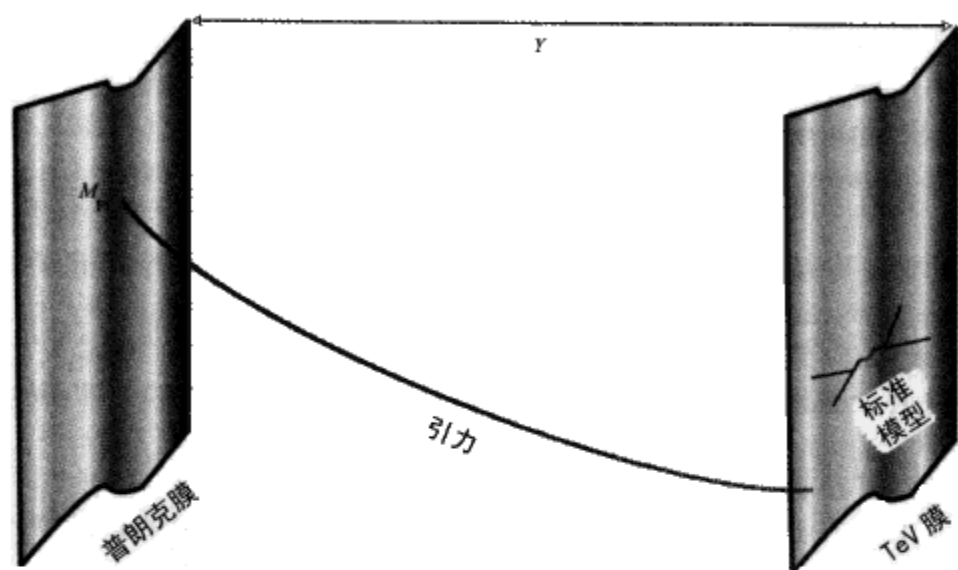


图 138 在原始的兰德尔-山德拉姆方案中，两片膜（分别称为普朗克膜和 TeV 膜）在蜷曲的第五维上相距  $Y$ 。尽管引力可以在体空间中自由徜徉，但是蜷曲的几何却使得引力被定域在膜上。引力相互作用的强度随着与膜之间的距离增大而指数衰减。在这种方案中，TeV 膜（标准模型所在的膜）上的引力强度简单地依赖于距离  $Y$

一遍：M 理论目前还不是一个定义完好的理论。不过看起来最适合用来讨论兰德尔-山德拉姆方案的理论框架就是 M 理论；而我们也的确在 M 理论那里发现了兰德尔-山德拉姆方案的痕迹。

如果兰德尔-山德拉姆方案真的正确的话，那么它有没有什么我们能找到的实验信号呢？桌面上的引力实验不能发现这种方案的有关证据：因为这一方案中引力就和牛顿理论预言的一样大。尽管兰德尔-山德拉姆方案是一个五维理论，但是蜷曲因子使得它看起来就像一个四维理论。所以桌面上的引力实验观测到的还将只是引力的平方反比律。但在 TeV 能区情况



就会有所变化。我们生活的这个膜有一个 TeV 能标，一旦我们达到这个能标，物理就会有所不同，粒子加速器上的实验将会发现兰德尔-山德拉姆方案的存在证据。在 LHC 能提供的能量区域上，与五维引力子相伴的卡鲁扎-克莱因粒子塔就会产生出来。如果 LHC 上发现了自旋为 2 的粒子塔信号，我们就可以说我们找到了满足 RS 方案的实验证据。在 ADD 方案中，卡鲁扎-克莱因能级间距不但相等而且还很小，所以看起来还像连续谱一样。RS 方案中也有卡鲁扎-克莱因态。但是由于第五维的蜷曲几何，能级间距不再相等。我们应该可以观测到独立的粒子。而且，RS 方案中的引力子激发态可能很轻，第一个引力子激发态可能只有 1TeV。如此之重的粒子不会受到天文学上的限制，这一点与大额外维度一样；但是兰德尔-山德拉姆方案中的引力子又足够轻，有可能在 LHC 上发现它们。

273

这是一场乐天派们的游戏，对于乐天派来说，RS 方案还有其他的可能信号。在原始的双膜方案中额外维的尺寸可以取任何值而且模型本身并没有定出第二个膜的位置。在 RS 的论文发表后不久，加州理工学院的两位研究人员沃尔特·高德博格（Walter Goldberger）与马克·怀斯（Mark Wise）研究了固定第二个膜的方法。他们发现有一个很管用的标量场——半径子场——可以决定额外维度的尺寸。半径子场必须是一个像引力子一样的体空间中的场，也就是说它可以在所有的维度中传播。但就像引力子一样，半径子场在四维空间中应该有可观测效应。半径子场的量子称为半径子。半径子是自旋为 0 的有质量场，在很多方面同希格斯场一样（就连仍未有实验证据这

274



一点也和希格斯场一样)。如果 LHC 上的实验真的能发现半  
径子，那么我们就有了额外维度存在的实验证据。

兰德尔和山德拉姆注意到另外一些与蜷曲时空几何有关的事情。他们引入两个膜——普朗克膜与 TeV 膜——来解决等级问题。他们又认为，假定等级问题是用另外的方法解决，我们就不需要用两个膜来描述物理。我们有可能是生活在一个普朗克膜上，而这个普朗克膜嵌入在一个第五维为无限大的五维时空中，而我们却对此一无所知。在这种方案中，由于有蜷曲因子的存在，发生在离普朗克膜很远的事件本质上与发生在普朗克膜上的物理无关。具有四个无限大空间维度的世界与具有三个无限大空间维度的世界看起来非常类似。正如笔者在第六章中所言，“如果我们日常的生活经验中有什么是确定的话，那就是：世界具有三个大的空间维度。”现在我们知道，由于第四维蜷曲而看不到，具有四个无限大空间维度的世界可能与我们的生活经验毫无矛盾。最终能确定的检验空间维度的将只能是实验，而不是我们的日常生活经验。

于是兰德尔和山德拉姆提出了两套有膜和蜷曲几何参与的方案——分别是 RS1 和 RS2（这里的 1 和 2 代表的是方案发表先后，而不是膜的数目。在第一套 RS1 方案中有两个膜；而第二套 RS2 方案中只有一个膜）。他们两人的研究激发了一轮研究热潮，因为这两种方案都能与现实的粒子物理和宇宙学联系得上。与 ADD 方案一样，实验上有可能发现满足这些方案的证据。几年之内，LHC 上的实验就有可能让我们知道我们是否生活在膜上。

## 时空真的是对称的吗？

根本不需要很多个实验。

要是真的能证明我错的话，有一个实验就够了。

阿尔伯特·爱因斯坦 (Albert Einstein)

2005 年是爱因斯坦奇迹年的百周年纪念。他在 1905 年的三大成就之一就是引入洛伦兹对称性来描述物理定律。洛伦兹对称性——物体学定律对于所有的惯性观测者来说都是一样的——将爱因斯坦带入了狭义相对论的世界。我们在第二章中看到，洛伦兹对称性的一个结果是空间与时间之间的区别变得模糊起来，我们生活在四维的时空中。但问题是洛伦兹对称性是大自然的精确对称性吗？

275

看起来在 M 理论中有洛伦兹对称性不精确成立的可能性。检验洛伦兹对称性可能会发现新物理信号，这有可能是探索 M 理论的一种办法。即使粒子加速器和桌面上的引力实验都不能发现 M 理论的证据，至少检验洛伦兹对称性是否破坏还是一种可行的办法。

印第安纳大学的艾伦·克斯特莱奇 (Alan Kostelecký, 图 139) 和他的合作者是洛伦兹对称性破坏方面研究的先锋。克斯特莱奇指出洛伦兹对称性有两种不同的表述方式。观测者洛伦兹对称性指的是物理定律对于所有的惯性观测者来说都一样。粒子洛伦兹对称性指的是相对于某一固定惯性参考系具有一定速度的粒子与惯性参考系中的静止粒子所感受到的物理定

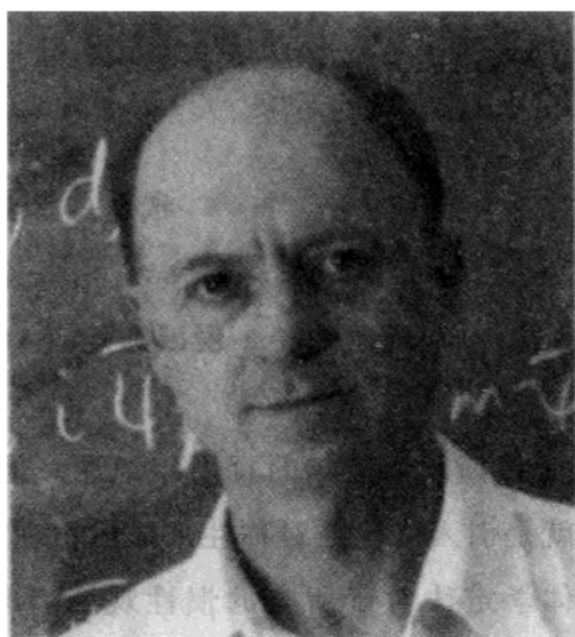


图 139 艾伦·克斯特莱奇

律相同。我们通常将这两种说法视作等同。比如，坐在开动的火车中的旅客与站在车站月台上的观测者感受到的物理定律是一样的，这就是一个观测者洛伦兹对称性的例子。如果坐在车厢中的旅客站起身来回走动——也就是说，如果他正在进行粒子的洛伦兹变换——那么又会如何呢？我们假定从开动的火车的角度来看，那么坐着的乘客和来回走动的乘客应该感受到相同的物理定律；走动的乘客只不过为我们的讨论多引入了一个等效参考系。因此我们可以假定观测者洛伦兹变换与粒子洛伦兹变换相同。但是克斯特莱奇指出如果洛伦兹对称性并不是精确成立的，那么两种变换就不等价。观测者洛伦兹对称性仍然成立；而粒子洛伦兹对称性就破坏了；走动的乘客所感受到的物理定律可能与坐着的乘客感受到的物理定律不同。

1989年，克斯特莱奇与纽约市立大学的物理学家斯图尔特·萨缪尔（Stuart Samuel）发现弦论具有一种有趣的性质。看起来早期宇宙允许洛伦兹对称性的自发破缺（在第四章讨论电弱统一的时候，我们已经看到了对称性自发破缺的重要性）。如果真的有这样的洛伦兹对称性自发破缺发生，宇宙中就会充满指向自发选择方向（正如磁偶极矩冷却形成磁场时沿着自发选择方向排列）的背景场。这些背景场破坏粒子洛伦兹对称性但保持观测者洛伦兹对称性。在某个此类背景场存在的情况下，穿行于时空中的基本粒子将感受到优先选定方向的相互作用。理论上，在指向不同方向的两个实验室中做的相同实验将会得出不同的结果。因为地球绕着太阳运动，所以一年中不同时间的同一实验也会给出不同结果。

克斯特莱奇理论中的洛伦兹对称性破坏发生在  $10^{19}$  GeV 的普朗克能标，这个能标常被认为是实验永远达不到的区域。但是克斯特莱奇和他的合作者认为洛伦兹对称性破坏的效应可以在实验上观测到；但不是通过常用的高能对撞机方法，而是利用超高精度的低能粒子测量。那么我们究竟需要多高的精度呢？因为 M 理论还不能确切地定义，所以我们没法准确地回答这一问题，但是我们可以大致地猜测一下。质子的静止质量是 1 GeV 而普朗克质量是  $10^{19}$  GeV，<sup>⑧</sup> 所以如果我们用质子来做实验的话，只要精度低于  $1/10^{19}$ ，我们就能有效探测普朗克标度上的物理。任何对洛伦兹对称性的破坏就会立即显示出来：标准模型中绝对没有什么可以破坏这一根本的对称性。

洛伦兹对称性的实验检验有很多可行的办法。传统的办法是迈克尔逊-莫雷（Michelson-Morley）实验，这个实验首次



实现是在 1887 年。正是由于这个实验，爱因斯坦提出了狭义相对论。迈克尔逊-莫雷实验试图探索的是光速对空间方向的依赖性（实际发现没有这种依赖性存在），因此相当于检验了洛伦兹对称性。1932 年做的肯尼迪-桑代克（Kennedy-Thorndike）实验通过寻找光速对速度的依赖性检验了洛伦兹对称性。2003 年，斯坦福大学的一个组做了这些实验的一个升级版——监控一对彼此垂直的圆柱形空腔内的微波。由于绕太阳公转的地球本身也要自转，实验组要做的就是寻找空腔共振频率的变化。但最终一无所获。另外柏林与巴西的一些实验组也曾独立做过类似实验，他们对蓝宝石水晶做成的共鸣器的共振频率进行了长达一年的观测，不过结果还是没有发现洛伦兹对称性破坏的信号。如果真的有光子导致的洛伦兹对称性破坏，那么最近的这些实验表明这种破坏将小于  $1/10^{11}$ 。

人们也可以在物质中寻找洛伦兹对称性的破坏。当地球绕太阳转动时，电子和夸克的自旋方向也许会相对于来自洛伦兹对称性破坏的固定背景场有所改变。举例来说，夸克自旋方向的改变会导致微波激射器（激光器的微波版）频率的改变。微波激射器的实验可以探测到很微小的频率改变，一些这样的实验已经证明中子（我们知道中子是由三个夸克组成的）导致的洛伦兹对称性破坏必须要小于  $1/10^{31}$ ；而对于质子，这个上限是  $1/10^{29}$ 。电子自旋方向改变可以用艾德尔博格-赫克尔（Adelberger-Heckel）扭摆来测量。艾德尔博格与赫克尔就利用这个装置测得电子导致的洛伦兹对称性破坏必须要小于  $1/10^{29}$ 。

人们还有其他一些检验克斯特莱奇理论的办法。比如，

CPT 对称性是与洛伦兹对称性密切相关的一种对称性。CPT 变换由三种变换组合而得：粒子与反粒子变换（电荷共轭变换，符号 C），空间反射变换（宇称变换，符号 P）以及时间反演变换（时间反演，符号 T）。实验上已经观测到每一种单独变换的破坏效应；另外 CP 组合变换也有破坏效应（见第四章相关内容）。但到目前为止，CPT 的联合变换仍呈大自然的精确对称性。2002 年，引入带色荷的夸克这一思想的物理学家奥斯卡·格林斯伯格（Oscar Greensberg）证明：如果 CPT 对称性破坏，则洛伦兹对称性必然破坏。反物质观测是寻找 CPT 破坏的最佳选择——如果 CERN 或者费米实验室的实验观测到 CPT 对称性的破坏，那么无疑洛伦兹对称性也是被破坏的。

克斯特莱奇发展出了一个讨论这个问题的常规框架。这种所谓的标准模型扩充版将各种破坏粒子洛伦兹对称性但保持观测者洛伦兹对称性的标准模型基本粒子相互作用添加到原始的标准模型中。这个理论有各种版本，既可以是只有与中微子有关的相互作用才能导致洛伦兹对称性破坏；也可以是只有与光子有关的相互作用导致洛伦兹对称性破坏，而夸克和轻子参与的相互作用不导致洛伦兹对称性破坏。标准模型扩充版中包含很多个洛伦兹对称性破坏的部分。这些部分中的大多数都还没有在需要的精度上探测过，但有些实验已经在计划中了。有可能——但仅仅是可能——这些实验会使我们粗略窥见 M 理论的某些方面。



## 火宇宙：当世界碰撞时

问题：上帝在创造天堂与地球之前干什么？

答案：他在为那些探究奥秘的人……准备地狱。

奥古斯丁，《忏悔录》Ⅺ卷 (*Confessions, Book Ⅺ*)

在晚近的物理学中，膜的概念非常关键。我们已经看到膜是如何在自洽的弦论中成为不可避免的组成部分，我们还知道膜扮演着与弦同等重要的角色。膜与对偶性的研究使得人们提出了 M 理论，一个封顶的十一维理论。M 理论的极限包括十一维超引力以及五种弦论。膜的概念也是探索黑洞熵的关键，并且还是阿卡尼-哈密德、迪莫普洛斯与德瓦利提出大额外维理论的出发点。而在兰德尔-山德拉姆的理论中，我们就生活在膜上。关于膜的性质，物理学家们已经发表了数以千计的论文，膜的思想是内涵最为丰富的思想之一。在我们即将结束探究现代物理中疯狂想法的旅程之际，让我们一起来看一下从膜中获取灵感的一个最新想法：火宇宙。

在宇宙学的标准模型中，宇宙诞生于 137 亿年前的一个奇点。那时的宇宙处于异常热、异常小、异常高密的状态。先不管奇点附近困难重重的物理，也不管奇点之前发生了什么；我们先来看大爆炸思想早期版本中的一个问题。如果我们向着空间中的不同方向望去，我们看到的应该是同样的事物：宇宙微波背景辐射在天空中的所有方向都是一样的，并且从星系簇中发现的平均物质分布在各个方向上也是一样的。在大尺度上，



宇宙趋向于平坦。大爆炸理论原始版本的问题在于：大爆炸之后很短的时间里，由于膨胀，宇宙的各部分会相距足够远，以至于光也不能在宇宙各部分彼此之间往来。因此宇宙的各部分就没办法将它们的温度调节成一个平衡值。如果我们查看天空中角度张的足够开的两块，我们本应发现两者具有不同的微波背景辐射温度；因为在宇宙大爆炸 30 万年后，随着辐射从物质中退耦，这样的两块再不可能偶然碰到一起。这些区域不可能“知道”它们是处于相同的温度。但是我们没有看到崎岖不平的宇宙，我们看到的是平坦均等的宇宙。这就是视界疑难 (horizon problem)，宇宙学家们必须要面对的一个难题。

解决这个问题的标准方案是暴涨，我们在第五章补充性文字“大统一及暴涨”中已经了解到这个理论的有关内容。阿列克谢·斯塔罗宾斯基 (Alexei Starobinsky) 与艾伦·古斯 (Alan Guth) 首先提出这个理论，之后莫斯科列别捷夫 (Lebedev) 研究所的安德列·林德 (Andre Linde) 与其时在宾夕法尼亚大学的安德里亚·奥布赖克特 (Andreas Albrecht) 和保罗·斯坦哈特 (Paul Steinhardt) 进一步发展了整个理论。在暴涨理论中，宇宙在大爆炸之后要经历一段指数膨胀的时期。我们现在所看到的整个宇宙（以及可以回溯到微波背景时期的整个宇宙）都是由原始大爆炸的一个很小的各部分彼此接近的区域放大而来的，这就是可见的宇宙为什么各处都有相同温度和密度的原因。暴涨的想法同时也解释了为什么我们在背景辐射中会观测到小小的不规则——这些小小的不规则原本只是很小的量子起伏，是暴涨将这些小的量子起伏放大到今天的样子。暴涨思想还能解释原始大爆炸思想其他一些方面的问题。

279



题，比如所谓的磁单极子问题——大爆炸产生了足够丰富的磁单极子，可是今天我们却一个都没有看到，原因就是暴涨将所有的磁单极子全部扫离了我们的地平线。最后，暴涨思想还能解释所谓的平坦性疑难——我们生活的这个位置距离大爆炸有137亿光年，这意味着宇宙密度在临界（或者说“平坦”）密度的 $10^{15}$ 分之一内。假如再密一点，宇宙就会重新坍塌；假如再疏一点，宇宙就完全散开了。看起来很难找到什么理由来解释为什么刚发生大爆炸的宇宙其密度应该如此接近于临界密度——但是暴涨时期的存在就可以使宇宙平坦，而不论其初始密度如何都是这样。

二十多年来，除了暴涨思想，还没有别的什么理论可以解决大爆炸理论的这诸多问题。暴涨思想当然会有很多的变种，但是其核心思想却是不变的：我们今天之所以能够看到一个平坦的宇宙，完全是因为在其刚刚诞生不足一秒的时间里，宇宙按指数膨胀。暴涨思想无疑是一个很好的解决方案。而且要是把这个暴涨思想放到额外维的框架下，似乎比原始的四维框架还要更好一些。不过目前我们还是有了（也许）另一种早期宇宙的物理图像。这种图像最早是在2001年由宾夕法尼亚大学的伯特·奥弗拉特（Burt Ovrut，图140），剑桥大学的内尔·图罗克（Neil Turok，图141），普林斯顿的理论学家安德里亚·奥布赖克特和保罗·斯坦哈特（暴涨模型的发起人之一，图142）以及斯坦哈特的研究生贾斯汀·霍里（Justin Khoury）等人提出来的。

这种新的想法称为膜世界（world-as-a-brane）方案。假定我们生活在一个3-膜上，而这个3-膜漂浮于具有四度空间

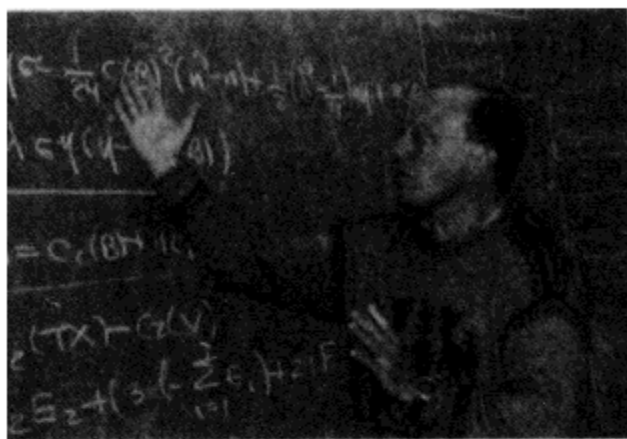


图 140 伯特·奥弗拉特是宾夕法尼亚大学的高能理论物理教授。他的研究工作集中在 M 理论与宇宙学方面（以及研究 M 理论中的几何所需要的新的数学方法）

维度的体空间中，再假定还有另外一个与我们的膜平行的膜也漂浮于同样的体空间中。这两片膜有可能就是体空间的边界面，就像风琴之类乐器的两端。要是两个边界面逼近彼此，会有什么发生呢？我们当然知道膜都是



图 141 内尔·图罗克

极其的重，因此运动的膜会具有巨大的动能，如果这两片膜彼此碰撞，那么就有可能释放出巨大的动能，这就是大爆炸的另一种解释。我们的膜原本空荡冰冷，两片膜在体空间看不见的维度上彼此接近，碰撞时释放出的巨大动能转化成了我们熟悉的粒子——夸克、电子、质子等；而这些粒子被禁闭在膜上，只能沿着膜的三个空间维度运动。在此之后，我们的膜就慢慢

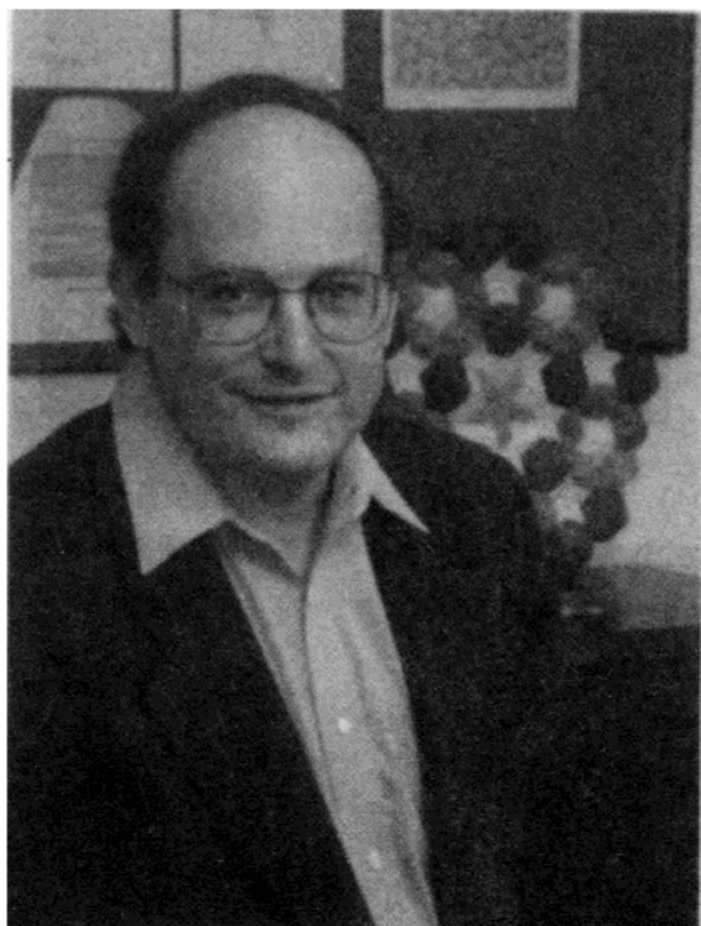


图 142 保罗·斯坦哈特是普林斯顿大学的阿尔伯特·爱因斯坦科学教授。他是宇宙学中的暴涨模型的建立者之一；还曾探索过有关暗物质的一些新颖模型。斯坦哈特同霍里、奥弗拉特以及图罗克合作，为传统的大爆炸宇宙学找来了一个竞争者——火宇宙

地膨胀成今天的样子。在原初碰撞之后所发生的一切就像标准的大爆炸宇宙学描述的一样。唯一的区别在于宇宙从未像标准的大爆炸方案中描述的那样有一段微小超密的时期。

霍里、奥弗拉特、斯坦哈特和图罗克将这个新方案称为火宇宙 (ekpyrotic universe)，ekpyrotic 这个词来自于希腊语中

的 ekpyrosis，其意思为“大火”。古代斯多葛学派有自己的宇宙模型，他们认为宇宙开始于一场突然的大火——这一点与现在在我们所说的膜的碰撞很相似。

火宇宙有一个明显的优点：尽管这个过程中涉及的能量巨大，但是碰撞过程中的温度却有限——因此没有奇点。而且，这个新的方案似乎也能将暴涨模型的所有成功之处重复出来。举例来说，由于碰撞温度太小，所以无法产生出磁单极子，这就解释了我们为什么没观测到磁单极子；因此我们并不需要再假设是暴涨使我们没能看到磁单极子。而且，能量的有关考虑保证了我们观测到的将是一个平坦的宇宙。宇宙之所以到处都一样是因为碰撞是发生在两片平行的膜之间；对于膜上的所有点，碰撞都是同时发生的。

281

火宇宙之说还能够正确解释我们在宇宙微波背景辐射中观测到的能量密度涨落。当两个膜彼此接近的时候，量子效应将使膜在额外维的方向上鼓起一些波纹，这些波纹就会比膜上的大部分点更早地碰撞。碰撞完成之后，两片膜彼此分离，而波纹引起的微小温度变化保存了下来；这些温度变化随后导致了星系形成以及我们在微波背景辐射中观测到的涨落。暴涨理论的一大成功之处就是正确地预言了微波背景辐射的涨落谱；这个新学说同样能够正确地预言微波背景辐射的涨落谱！或许我们真的有了新的选择。

现在我们来谈谈这个方案中的一些问题。先来看一个例子，火宇宙虽然解释了宇宙平坦性的由来，但这个解释有一个前提，那就是这两片膜要完全平行才行；就像撞击铙钹那样。如果这两片膜是成一个角度碰撞，那我们就会观测到天空的各

282



向异性。现在的问题就是这两片膜一开始为什么会彼此平行？这个问题看起来好像没什么好答案。火宇宙还有其他一些问题，比如精确解释第五维上的细小波纹是如何经历碰撞过程的，并且之后又如何成了微波背景辐射涨落的起源。不管怎么样，火宇宙最终要成为大家接受的宇宙模型的话，还有很多问题需要处理。暴涨理论建立在大家熟知的量子场论基础之上，并且已经经过了二十多年的不断研究，而火宇宙则基于大家对M理论的理解非常有限，并且还没有经历过人们给予暴涨理论的那般详细研究。幸运的是，我们现在所处的时代，正好是人们开始用实验观测来回答宇宙学问题的年头：我们很快就可以知道在暴涨理论和火宇宙中，究竟哪一个才是正确的。

区分这两种截然不同的学说的关键在于：暴涨说会将原初引力波放大足够多，以至于今天的微波背景辐射中将有明显的温度涨落。而火宇宙说中则没有暴涨时期，所以就不会给出这种宇宙微波背景辐射中引力波效应的预言。普朗克巡天仪计划于2007年升空，它有能力探测到微波背景中的引力波信号。如果发现了有关信号，我们就可以将火宇宙说排除掉，那我们差不多就可以相信暴涨理论才是上面提到的视界问题、平坦性疑难以及磁单极子等问题的正确解决方案。

但在我们还没有获得观测数据之前，宇宙学家们只能更加细致地探索火宇宙的有关性质。人们已经找到原始思想的一个变种，这个新版本对我们的宇宙有着完全不同的看法。

按照传统观点——所谓传统观点就是大多数宇宙学家支持并且天主教会也能接受的观点：宇宙开始于某个特别的瞬间。更准确地说，宇宙开始于137亿年以前，追问宇宙开始之前毫

无意义。而火宇宙思想则允许我们再翻出一个古老的思想：或许宇宙生命无限，无始无终。

斯坦哈特与图罗克认为暗能量——使得宇宙加速膨胀的神秘的真空能——可以在体空间中产生吸引力。第五维上的真空能量在两个边界膜之间就像一根皮筋一样，我们一起来想象一下下面这幅物理图像。真空能将两片边界膜越拉越近，最后碰在一起。碰撞的能量导致了束缚于膜上的观测者（比如我们这样的观测者）称之为大爆炸的事件。膜膨胀变冷，上面形成了星系，最终膜上的真空能量导致了缓慢加速的膨胀。但是同时，膜在体空间的第五维上已经弹得很远。而两个膜之间具有吸引性的真空，阻止两个膜彼此远离，而是彼此靠拢地运动。最后两个膜会再次碰撞，一次新的大爆炸产生了。循环往复，永不停歇。两次碰撞之间相隔时间很长；两片膜再次碰撞的时候，彼此已经膨胀了千万年。这时的膜已经足够冷却，所以经历大爆炸的区域将又循环再现之前的温度。每一次循环都与最后一次大体相同（尽管每次循环都会有一些微小的不同之处）。如果我们可以在体空间之外来看这个过程，我们将会看到两个膜在第五维上振动不息。

283

或许，宇宙本来就没有开始，或许，宇宙与它的同伴们永世长存，注定振荡不息，时不时地两个宇宙就会相撞而成为一团火球。如此碰撞的结果就是一个适合生命起源的世界——最终会诞生出喜爱探究世界起源的生命。



## 人存原理

人是所有事物的量度。

普罗泰戈拉 (Protagoras)

将物理学家们引向 M 理论的是对基本物理统一理论的追求。这个统一理论不是随便的某一个统一理论，而是独一无二的统一理论。大多数弦论学家们希望看到的是 M 理论只有一套数学上自洽的公式系统；这套独一无二的公式系统会将粒子物理的标准模型、广义相对论以及其他各种实验上发现的宇宙性质统统包括于其中。

尽管现在为时尚早，但我们必须要说，希望正变得越来越渺茫。我们在第七章中已经看到，可以使十维超弦理论紧致于其上的卡拉比-丘流形有数千种。每一种卡拉比-丘流形的几何都可以用数百个参模描述，而每一个参模都会给出方程不同的正确解。膜可以按很多种令人眼花缭乱的方式缠绕在卡拉比-丘流形上。以上所有的这一切都意味着弦论大概有超过  $10^{100}$  种不同的真空——弦论不同的解。每一种不同的解都会为我们观测到的四维世界带来不同的基本物理，而且所有的解都是等价的。但是，至少在我们目前的理解水平上，M 理论并没有告诉我们哪一种解才是我们真正需要的。也许我们真的已经拥有了一个独一无二的统一理论——但这个统一理论却有  $10^{100}$  种以上的等价解，而且我们无法挑出哪一种才是描述我们所观测到的这个宇宙的解。



这个问题有一种解决办法，那就是人存原理。虽然这种方法不能为大多数物理学家所接受，但看起来我们或许将被迫接受这一方案的某种形式。人存原理来自于一个基本的观测事实：宇宙的很多方面似乎都“精调”到适合生命产生并兴旺繁衍的程度。如果宇宙常数再大一点，或者弱作用力再强一点，又或者中微子的质量再大一点——那么我们就不会在这并观测到这些结果了。宇宙的基本参数如果再有一点变化的话，宇宙中将不可能有生命存在。假定宇宙比我们观测到的部分大很多很多，再假定这个巨大的宇宙包括了所有可能的 M 理论真空结构，每一种真空结构对应着一种不同的“袖珍”宇宙，那么就会有超过  $10^{100}$  个这种“袖珍”宇宙，每一种都有它自己的物理定律、自己的标准模型甚至于自己的空间维数，而我们则碰巧生存在一个允许我们存在的宇宙中。

## 即将到来的吸引力

世界比我们想象的更加疯狂。

路易斯·麦克尼斯 (Louis MacNeice), 《雪》(Snow)

本书出版的时候。桌面上的引力实验、宇宙线观测、引力波探测器或者是对现有数据的深入分析可能又发现了新的物理。所有上面提到的这些实验与分析或许会让我们初窥一下“看不见的世界”的物理。不过要是它们所发现的一切都可以用现有的物理学两大支柱——广义相对论与量子力学——解释的话，那我们该如何是好呢？要是真的那样，那我们就只能等



到 2007 年春天，那时期待中的大型强子对撞机就要开始运行了。<sup>①</sup>

LHC 的对撞粒子束的总能量将达到 14 TeV。其中每一束又由大量的分段的质子束组成——每一段中包含了差不多 3000 束长 7.5 厘米质子束。每一质子段经过后，会有 3 微秒的延迟，然后再来另一段。1300 多个极其强大的超导磁体将引导着这些质子束在长达 27 千米的隧道中穿行，隧道里原先安装的是 LEP 对撞机。在隧道中某些精心选择的点上，质子束将以工程上前所未有的能量彼此相撞。

很多证据表明，在 TeV 能量区域附近一定会出现新物理。LHC 的碰撞粒子数如此之多，碰撞能量又是如此之大，物理学家们这次可以好好地探索一下 TeV 能区的物理了。

那么他们可能发现什么呢？

首先要关注的当然是希格斯粒子了。我们在前面的章节中已经看到为何标准模型要求希格斯玻色子存在。不管是理论考虑还是在诸如 LEP 这样的现有对撞机中积累的实验数据都表明希格斯粒子的质量范围一定在 LHC 的掌控之内。如果有必要，LHC 可以一步步地搜寻希格斯玻色子质量可能取值的区域，并终将发现这个神秘的玻色子，而这就是 LHC 的第一个发现目标（图 143）。

LHC 上的另一个比较重要的探寻目标应当是超对称的存在证据。如果胶子与夸克的超对称伴——胶微子与标量夸

---

<sup>①</sup> 译者注：本书中文简体字版出版时，LHC 大概才会正式开机。直到 2007 年夏天，LHC 仍未运行。

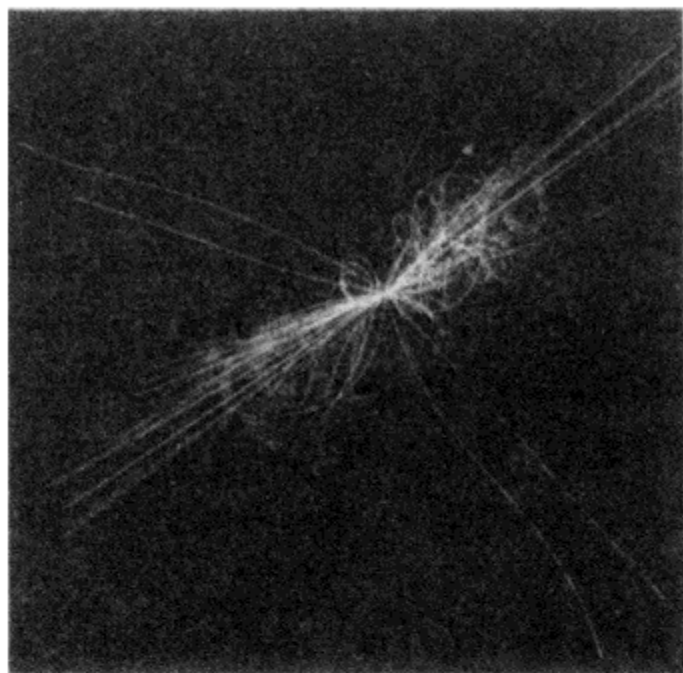


图 143 另一幅计算机模拟图，一个希格斯玻色子衰变成四个  $\mu$  子的探测器信号。中心射出的两个  $\mu$  子向着左上方向飞去；另两个  $\mu$  子向着右下方向飞去。希格斯玻色子可能是 LHC 上发现的第一个新粒子

克——质量不大于  $2\text{TeV}$ ，那么 LHC 就有能力发现这些超对称粒子。尽管  $2\text{TeV}$  已经比已知粒子质量大很多了，但是对于 LHC 来说不成问题。物理学家们已经研究这些超对称粒子可能的产生信号多年了。如果 LHC 上真的产生了超对称粒子，那么我们完全知道应该寻找什么样的讯号。

多年来，超对称一直都是粒子物理学家们看得很重的部分。但是在前面的章节中我们也看到了超对称所面临的一个主要问题——规范等级问题——也可以用其他方式解决。比如在大额外维度方案中，只有引力可以感受到大额外维度的存在，这样就解释了引力之弱，从而解决了规范等级问题。如果

286



这一理论正确，那么 LHC 将成为一个黑洞工厂。这样的前景令人期待。

我们也曾看到规范等级问题可以由蜷曲的额外维度理论更加自然地得以解决。如果基于这样想法的模型正确的话，那么 LHC 上就将产生引力子的卡鲁扎-克莱因激发态。这些新的粒子可以在五维空间中自由运动，它们将从我们的四维世界中带走能量。我们发送出去的粒子将进入到第五维！

关于额外维度，物理学家们已经提出了各种各样的想法，而我们讲述过的只是其中的一些。不久之后，LHC 将检验这些想法。

假定 LHC 最终一无所获，我们又该如何是好呢？事实上，发现不了希格斯玻色子比发现希格斯玻色子还将令人惊讶。不过利用他们的想象与创造力，理论物理学家们还是能够写出不需要希格斯玻色子的标准模型更新版（事实上，物理学家们已经研究无希格斯理论很多年了）。要是不能发现超对称，或者发现不了大额外维度，那将令人非常失望。到那时，我们就只好接受 M 理论才是描述宇宙的正确理论这样的信念，但同时也要接受空间的额外维度蜷曲到不可见的普朗克标度  $10^{-35}$  米以及大自然在对撞机无法触及的区域破缺超对称这样的一些事实。如果真是那样就太不幸了：因为这意味着我们仍然停留在——而且没人知道要停留多久——拥有一个我们不知道如何检验的理论的位置上。或许我们将被迫接受人存原理：在 M 理论众多可能的解中，我们恰好生存在我们观测到的某个解所主导的世界中。

不过还是有其他的可能性。或许 LHC 既未发现希格斯粒

子，也没发现超对称或者是额外维度。但是却发现了某些人们完全料想不到的东西！LHC 将进入到不可预知的领域，也许会发现一条龙。不过这也正是我们建造 LHC 这样大型机器的原因所在：探索未知，而不只是确认我们已经自以为了解的东西。那将是所有可能中最令人兴奋的前景——实验发现将理论物理学家们带回到黑板前，要求他们创造出更加疯狂的想法来解释我们的大机器向我们展现出来的这个宇宙。到那时，我们将再次寻找关于看不见的世界的真正答案。

## 小辞典

**阿贝尔群：**变换群的一种，结果不依赖于变换的先后顺序，即是说，变换具有可交换性；另一方面，对于非阿贝尔群，变换的先后顺序极为重要。

**AdS/CFT 对应：**将反德·西特时空（AdS）空间中的引力理论与时空边界没有引力的共形场论（CFT）对应起来的一种对称性。根据这一理论，引力与场论有很深层次的联系。其确切性质还在研究中。

**湮灭：**粒子与其反粒子彼此碰撞彼此消亡产生新粒子的过程。例如，电子及反电子彼此湮灭产生一对光子。

**反常：**源于潜在理论对称性的守恒定律由于量子修正而被破坏，这样的相对论性量子场论就会具有反常。一种理论必须与其反常无关的要求对理论结构提出了很强的限制。

**反德·西特时空：**广义相对论的一个高对称性解，描述了具有负的宇宙常数的空宇宙。

**反粒子：**粒子与其反粒子具有相同的静止质量，但彼此却有“镜像反转”的性质。例如，粒子与其反粒子具有完全相反的电荷。有一些粒子，如光子，本身就是自己的反粒子。

**渐近自由：**量子色动力学中，色相互作用随着夸克与胶子彼此距离的缩

短而变弱的现象。

**重子：**由三个夸克的束缚态构成的亚原子粒子，重子具有半整数自旋。

质子和中子是最常见的重子，现已发现的重子大约有一百多种。

**大爆炸：**现在一般认为我们的膨胀中的宇宙起源于 137 亿年前的一次大爆炸。大爆炸后的瞬间，宇宙处于超高密度和极热状态。

**黑洞：**具有极高密度的物质。极强的引力场使得任何物质——甚至光——一旦和黑洞的视界相交都不能逃逸。

**玻色子：**具有整数自旋的粒子，基本的玻色子包括光子、胶子、W 玻色子与 Z 玻色子，以上这些粒子自旋都是 1，引力子为自旋 2 的玻色子。可以认为玻色子是“力的粒子”。另一种玻色子是自旋为 0 的希格斯玻色子，理论物理学家一般认为基本粒子通过与希格斯玻色子有关的机制获得质量。现代实验（直到 2004 年 4 月）仍没有发现希格斯玻色子。<sup>①</sup>

**BPS 态：**一种特别的具有超对称性的量子态，其性质只通过对称性的讨论就可以了解。

**膜：**M 理论中的研究对象。 $p$ -膜具有  $p$  个空间维度；0-膜就是粒子，1-膜就是弦，而 2-膜就是隔膜，等等。在某些理论中，我们的宇宙被解释为嵌入在高维空间中的 3-膜。

**膜子：**假想中的粒子。如果我们的宇宙真是嵌入在高维时空中的膜，那么膜是可以在这些维度中波动的。量子力学原理告诉我们这种波动的表现形式就是所谓的膜子的存在。

**体空间：**某些理论中，嵌入在高维时空中的多维膜被称为体。规范场有可能紧闭在膜中，而引力可以在体中自由传播。

**卡拉比-丘空间：**一种特别的空间，在这个空间中，超弦理论的六个额

① 译者注：直到 2007 年 8 月，仍未发现希格斯玻色子。



外维度可以发生紧致化。

**CERN:** 欧洲原子核研究中心——世界上最大的粒子物理实验室。坐落于法国瑞士边界的日内瓦附近。CERN 的大型正负电子对撞机于 2000 年正式关闭，让位于即将于 2007 年启动的大型强子对撞机 (LHC)。

**荷:** 粒子具有的某种量，确定粒子是否参与某种相互作用。例如，带有电荷的粒子参与电磁相互作用，带有色荷的粒子参与色相互作用（即强相互作用）。

**手征性:** 即“手征性质”。弱相互作用具有手征性：弱相互作用可以区分左手性和右手性的费米子。

**经典物理:** 量子原理出现之前的物理。在包括牛顿力学的经典物理中，诸如能量之类的物理量被视作是连续变化的。量子力学中，物理量可以离散地变化。经典物理很好地解释日常生活中的各种现象；只是当物理学家向着更小尺度前进时，就必须使用到量子力学。

**闭弦:** 弦论中，没有自由端点的弦圈称为闭弦。引力子被解释为闭弦的一种特殊振动模式。

**冷暗物质:** 观测表明，在星系周围有不可见的物质构成的晕。暗物质的质量是所有可见物质质量的很多倍。暗物质的温度可以用来测量其中的粒子以多快的速度运动。冷暗物质指的是其中粒子运动速度远小于光速的暗物质，而热暗物质指的则是其中粒子的运动速度接近光速的暗物质。

**色:** 夸克和胶子所携带的一种荷。有三种不同类型的色荷，分别为红、绿、蓝。自然界中不能看到孤立的色荷，我们所能观测到的夸克组合必定是色中性的。重子是三个夸克的组合（色荷分别为红、绿、蓝）；介子是夸克与反夸克的组合（一个有某种色荷，其反粒子带有相反的色荷）。

**紧致化:** 一般认为弦论要求的额外空间维度蜷曲成不可见的小空间从而



不能观测到（即紧致化）。

**禁闭：**实验上不能观测到孤立的**夸克**或**胶子**，带色的夸克和胶子只能组成无色的**强子**。不过人们还不能证明描述夸克和胶子相互作用的理论——**量子色动力学**——确实具有禁闭。但是近来人们已经证明了超对称性量子色动力学具有禁闭的性质。

**共形场论 (CFT)：**一种在所有区域上看起来都一样的相对论性量子场论。**弦论**中，弦的振动可由存在于弦的世界面上的二维共形场论描述。

**共形对称性：**保持不同方向之间的角度不变的变换就是共形变换。

**守恒定律：**粒子之间进行相互作用时，某些量（如电荷、能量、动量）在相互作用前后保持不变。守恒定律是我们关于我们的宇宙所能给出的一些最深刻的陈述。守恒定律是由宇宙的某些对称性导出的。

**宇宙线：**来自于外层空间且穿越地球大气层的高能粒子束，通常是一些质子或原子核。

**宇宙常数：**原始广义相对论方程中的一项。现代物理学家一般将它定义为真空的能量密度。计算宇宙常数的值是 **M 理论** 的巨大挑战之一，这些理论的计算值很大，而实验的观测值则很小。

**耦合常数：**描述给定相互作用强度的参数。

**德·西特时空：**广义相对论方程的一个高对称性解，所讨论的宇宙中没有物质但却有正的宇宙常数。具有这种性质的宇宙按指数增长率膨胀。

**伸缩子：**一种假想的标量场，在卡鲁扎-克莱因理论或其他有高维空间理论中自然引入的场。

**对偶性：**具有相同物理结论的两种不同的理论之间的对称。

**火宇宙：**一个假想理论，我们的世界起始于两片平行膜的碰撞。

**电磁相互作用：**带电的物体之间由于带**电荷**而具有的相互作用，这一相



互作用通过交换光子传递。描述这种相互作用的相对论性量子场论称为量子电动力学。

**电子：**一种基本粒子（属轻子），电子带有一个单位负电荷，质量 0.511 MeV。电子构成原子的外层空间。

**电子伏 (eV)：**一单位电子穿过相差为一伏特的电场时，电子所获得的能量。原子中电子的束缚能为电子伏量级；正是因为这一束缚能很低，所以我们才能很轻易地就得到自由电子。

**电弱相互作用：**高能物理中，电磁相互作用和弱相互作用可以用统一的电弱相互作用理论描述。电弱相互作用是标准模型的重要组成部分。

**熵：**物理系统中混沌度的量度，系统处于相互作用时，系统的熵永不减少。

**等价原理：**对于足够小区域的观测者来说，不可能分辨某种效应究竟是由引力场引起的还是由加速度引起的。等价原理告诉我们：对于所有的观测者来说，不管他们处于什么样的运动状态中，只要恰当地引入引力场，他们都可以被认为是处于静止状态。基于等价原理，爱因斯坦建立了他的广义相对论。

**视界：**黑洞周围逃逸速度等于光速的区域。视界看起来像是空间中的半透膜：一个物体一旦穿过视界进入黑洞，就永远别想逃出去。

**不相容原理：**全同费米子不能处于相同量子态上（而玻色子则正相反：不管有多少个玻色子，都可以处于相同的量子态上）。

**扩充超引力：**原始的超引力理论只有一种 ( $N=1$ ) 超对称变换，超对称变换大于 1 的超引力理论称为扩充超引力理论。共有八种超引力理论，从  $N=1$ （原始的理论，只有一种引力子）一直到  $N=8$ （有八种引力子）。扩充超引力理论的粒子内容受对称性的精确限制。

**临界黑洞：**一种具有与其电荷一致的最小质量的黑洞。这样的黑洞与 BPS 态密切相关。

**费米实验室：**坐落在伊利诺伊州巴达维亚 (Batavia) 的美国国家加速器实验室。根据著名的物理学家恩里克·费米命名。目前，费米实验室中加速器能产生世界上最高能量的粒子；CERN 的大型强子对撞机 (LHC) 开始运行后，将接过费米实验室的这一显赫殊荣。

**费米子：**自旋为  $1/2$  的粒子。轻子和夸克的自旋都是  $1/2$ ，因此都是费米子。我们可以将费米子看成是“物质的粒子”。

**费曼图：**粒子相互作用的图形表示。利用费曼图，我们可以计算出给定量子过程发生的几率。

**味：**不同类型夸克的特征，共有六种味：上 (u)，下 (d)，奇异 (s)，粲 (c)，顶 (t)，底 (b)。

**规范理论：**基于规范对称性的相对论性量子场论。两个极为重要的规范对称性是阿贝尔群  $U(1)_{EM}$  以及非阿贝尔群  $SU(3)_C$ 。前者描述的是光子与带电粒子之间的相互作用；后者描述的是胶子与带有色荷的粒子之间的相互作用（夸克与胶子都带有色荷）。以上两种是未破缺的规范对称性。描述电弱相互作用的  $SU(2)_L \times U(1)_Y$  群自发破缺。规范对称性意味着无质量规范玻色子的存在；规范对称性的自发破缺使得某些规范玻色子获得质量。

**广义相对论：**爱因斯坦狭义相对论的推广。其中，引力可以看成是时空的弯曲。

**吉电子伏 (GeV)：**10 亿 ( $10^9$ ) 电子伏。利用爱因斯坦质能等价关系 ( $E=mc^2$ )，质子的质量相当于 1GeV。

**整体对称性：**对所有时空点做相同的变化时，系统具有不变性，则称系统具有整体对称性。

**胶球：**两个或更多个胶子组成的无色束缚态。

**胶微子：**胶子的超对称伴。

**胶子：**强相互作用的传递者，自旋为 1 的玻色子。胶子带有色荷，因此



可以感受到强相互作用，即可以彼此相互作用。

**大统一理论 (GUT):** 统一强相互作用和弱相互作用的理论。新的力出现在极高的能量区域，这一能量区域太高以至于实验上行不通。大统一理论的一般性预言是**质子衰变**。不过直到今日，物理学家仍然没有发现这样的信号。

**引力子:** 引力场的量子粒子，无质量，电中性，自旋为 2。**弦论**中，引力子就是**闭弦**。

**引力微子:** 引力子的超对称伴，自旋为  $3/2$ 。

**引力:** 按质量作用于物体之间。在爱因斯坦物理图景中，引力产生于物体质量-能量所引起的**时空扭曲**。在量子图景中，物体之间通过交换**引力子**产生引力相互作用。

**群:** 如果某个集合中的所有元素在某种操作下满足四个简单性质，我们就说这些元素在此种操作下构成群。这四个简单性质是：封闭性（例如集合中元素  $a$  与  $b$ ，对  $a$  与  $b$  进行某种操作后，结果仍然是集合中的元素），结合律（运算顺序发生变化结果不变），单位元（群中必须有一个单位元  $e$ ，即使说任意的  $a$  与  $e$  作用时，最后的结果总是  $a$ ），逆元（集合中的每一个元素必定有一个对应的元素，这两个元素彼此作用时结果为单位元）。在物理学上，群论的重要意义在于**对称变换**可以构成群，因此我们可以用**群论**来研究有关问题。

**群论:** 处理**对称性**的数学分支。

**强子:** 由**夸克**组成的复合粒子。共有两种强子：三夸克态的**重子** ( $qqq$ ) 以及正反夸克构成的**介子** ( $q\bar{q}$ )。

**螺旋性:** 粒子自旋在运动方向的投影。粒子的螺旋形要么是左手性要么是右手性。到底是哪一个取决于自旋沿着运动方向还是逆着运动方向。

**杂化弦:** 闭弦，右移振荡类似于 II 型超弦理论；左移振荡类似于玻色型

超弦理论。存在两种不同类型的杂化弦理论：一种基于  $SO(32)$  规范群；另一种基于  $E(8) \times E(8)$  规范群。这两个理论是五种自洽的超弦理论中的两种。

**等级问题：**关于如何理解电弱能标（大约  $1 \text{ TeV}$ ）远离普朗克能标（大约  $10^{16} \text{ TeV}$ ）的问题。量子效应应该将电弱能标拖到普朗克能标。在尝试解决这一问题的过程中，发展出很多有趣的理论物理思想。

**希格斯玻色子：**某种遍布于整个宇宙的自旋为零的标量场量子。尚未在实验中发现。在电弱相互作用这类需要对称性自发破缺的理论中扮演重要角色。人们相信基本粒子通过与希格斯场相互作用获得质量。

**希格斯微子：**希格斯玻色子的超对称伴。

**高能物理：**粒子物理的另一种说法。先是原子，接着原子核，然后夸克，物理学家们不断地探索着越来越高的能量（相应着也就是越来越小的距离）。

**全息原理：**关于引力的量子理论的一个想法，全息原理认为引力的量子理论必须要能用存在于某个空间表面的理论描述该空间内的情况。

**卡鲁扎-克莱因理论：**一种存在额外维度的量子理论。而之所以未能观测到额外维度需用紧致化解释：额外维度被蜷曲到很小的尺寸上。

**大型正负电子对撞机 (LEP)：**粒子加速器，周长  $26.7$  千米，坐落于 CERN 地下  $100$  米的位置。在  $2000$  年让位于大型强子对撞机 (LHC) 之前，已经运行了  $11$  年。LEP 上的实验在很高的精度上检验了标准模型。

**大型强子对撞机 (LHC)：**CERN 的粒子加速器，可以在前所未有的能量上实现质子或重离子的正面碰撞。计划于  $2007$  年春首次运行。

**长度收缩：**狭义相对论效应，运动物体在运动方向上看起来会变短。

**轻子：**一种基本粒子，不具有色荷，因此不能参与强相互作用；但是参与弱相互作用和电磁相互作用。轻子共有三代：电子及其中微子， $\mu$



子及其中微子， $\tau$ 子及其中微子。

**李群：**某种数学方程所具有的连续**对称性**。数学家们已经研究过所有可能的李群的性质。李群在粒子物理的理论研究中扮演着重要角色。

**最轻的超对称粒子 (LSP)：**大多数超对称模型都具有一个量，这个量可以保证最轻质量的超对称粒子是稳定的：这个最轻的粒子不能衰变成更轻的超对称粒子。LSP的一个候选者是**中性微子 (neutralino)**。

**局域对称性：**如果不同时空点按不同方式变换时，某种**对称性**仍然成立，则这种对称性被称为局域对称性。只有在一定的限制条件下，比如引入抵消的规范场，局域对称性才能成立。

**洛伦兹不变性：**在所有惯性系中，物理定律都具有相同的形式，这种**对称性**即为洛伦兹不变性。

**磁单极子：**假设存在的**磁荷**，实验上并没能观测到。磁单极子产生的磁场类似于很长且无限细的线圈（螺线管）端点产生的磁场。相当多的大统一理论中都有一般性的理由支持磁单极子存在的假设。

**质能等价关系：**根据狭义相对论，一定量的能量等价于一定量的质量（具体的关系式为  $E=mc^2$ ，其中  $E$  为能量， $m$  为质量， $c$  代表光速）。

**兆电子伏：**100 万 ( $10^6$ ) 电子伏。根据爱因斯坦**质能等价关系** ( $E=mc^2$ )，质子的**静止质量**为 938 MeV，而电子的**静止质量**大约为 0.511 MeV。

**介子：**正反**夸克**对束缚态构成的亚原子粒子， $\pi$ 子是最轻的介子，由上夸克、下夸克及其反夸克组成。其他重要的介子有 K 介子以及 B 介子等。

**参模：**确定紧致的卡拉比-丘空间各种维度的大小和形状的参数。参模为**标量场**；这些标量场可能在宇宙学和高能物理中扮演重要角色。

**动量：**物体质量与速度的乘积。

**M 理论：**将五种自治的十维超弦理论及十一维超引力理论统一起来的理

论框架。理论学家们已经掌握了 **M 理论** 的一些零散信息，不过完全地理解这一理论仍有很长的路要走。

**$\mu$  子**：一种轻子，比电子重，比  $\tau$  子轻。

**中性微子 (neutralino)**：最轻的电中性的超对称粒子。自旋为  $1/2$ ——**光微子**，**Z 微子** 以及 **希格斯微子** 的量子组合。中性微子是 **冷暗物质** 的一个候选者。与所有其他普通粒子的超对称伴一样，人们至今没有在实验上观测到中性微子。

**中微子**：电中性轻子。人们曾一度认为中微子无质量；现在看起来中微子可能是有质量的（不过即使中微子有质量，也相当的小）。每一个带电轻子都有一个中微子：**电子中微子**， **$\mu$  子中微子**， **$\tau$  子中微子**。

**中子**：电中性的重子，**ddu** 夸克三重态。中子是原子核的基本组成。

**诺特定理**：非正式说，诺特定理讲的是一个理论的每一种连续**对称性**对应着一种**守恒律**，反之亦然。

**开弦**：**弦论**中，一根弦有两个自由端点。端点可以连到称为**膜**的研究对象上，并且膜的很多性质都与端点有关（开弦与引力无关，引力来自于闭弦的振动）。

**宇称**：一种量子数，表征一个粒子（或粒子系统）**波函数**在分立变换下的**对称性**。例如，**C**宇称表征的是粒子替换为反粒子时的波函数的对称性；**P**宇称表征的是系统镜像反演下的波函数对称性。

**粒子加速器**：像 CERN 或者费米实验室里的那样一些大型机器。将粒子束加速到接近光速然后使之彼此碰撞，通过研究碰撞的残余物，物理学家们就会了解基本物质结构。

**微扰论**：一种逐阶近似求解难题的办法。比如，一个问题的真正答案可能是 10.576，微扰论的零阶近似值可能是 10，一阶近似可能是 0.5；二阶近似可能为 0.08；于是我们逐渐收敛于真实值。

**光微子**：光子的超对称伴。



**光子：**自旋为 1 的玻色子，传递电磁相互作用。光子并不带电荷，所以自身不能感受到电磁相互作用。

**普朗克面积：**普朗克长度平方代表的面积。其值为  $1.64 \times 10^{-69}$  米<sup>2</sup>。根据全息原理，大自然在每一普朗克面积上只能编码 1 字节（bit）的信息。

**普朗克常数：**作用量量子——决定量子力学效应标度的基本量，光子的能量正比于普朗克常数与其自身频率之积；数值大小为  $6.62620 \times 10^{-34}$  Js，符号为  $h$ 。

**普朗克长度：**长度的“自然”单位，用大自然的基本常数定义。等于  $\sqrt{Gh/c^3}$ ，其中  $h$  为普朗克常数， $G$  为牛顿引力常数， $c$  为光速。其值为  $4.05 \times 10^{-35}$  米。普朗克长度上的物理由量子效应主宰。

**普朗克质量：**质量的“自然”单位，用大自然的基本常数定义。等于  $\sqrt{hc/G}$ ，其中  $h$  为普朗克常数， $G$  为牛顿引力常数， $c$  为光速。

**普朗克标度：**如果我们沿时间向后外推出宇宙的历史，宇宙学会告诉我们宇宙变得越来越密，越来越热，相关的距离标度则越变越短。如果距离标度短到一定程度（原子尺度或者更小），则我们必须要用量子力学来解释物理现象。最后我们外推到大爆炸的时刻时，我们就必须要用完整的引力量子理论。这时就是普朗克时期，对应的距离、能量、时间就是普朗克标度。

**正电子：**电子的反粒子。正电子带一单位正电荷；静止质量与电子的静止质量一样。

**质子：**带正电荷的重子，uud 夸克三重态。质子也是原子核的基本组成。

**量子色动力学（QCD）：**描述夸克之间通过交换胶子而相互作用的相对论性量子场论。

**量子电动力学（QED）：**描述带电粒子之间通过交换光子而相互作用的相对论性量子场论。



**量子力学**：微观尺度的物理。量子力学与经典物理之间的主要区别在于：各种物理量——诸如能量、电荷、动量、角动量，都是用称为量子的分立量来描述。

**夸克**：一种带有色荷的基本粒子，可以参与**强相互作用**、**弱相互作用**以及**电磁相互作用**。夸克分为六种类型（或称为六种“味”）：上夸克（u），下夸克（d），奇异夸克（s），粲夸克（c），顶夸克（t），底夸克（b）。（u，d）夸克构成一代，（c，s）夸克为另一代，（t，b）夸克为第三代。

**半径子（radion）**：半径子场的量子粒子。双膜兰德尔-山德拉姆方案中假设存在于**体（bulk）**空间的**标量场**，起稳定膜的位置的作用。半径子具有质量，研究表明，如果半径子真的存在，**大型强子对撞机**上的实验将发现相关证据。

**兰德尔-山德拉姆方案**：兰德尔-山德拉姆方案假定我们的宇宙为嵌入在五维时空中的3-膜。**体空间**的额外维度蜷曲起来。如果存在另一个在额外维度上距离我们的3-膜很近的3-膜，且引力定域在该膜上，则蜷曲因子将使得我们的膜上的引力很弱。于是该方案解决了**等级问题**。该方案的一个后续版本提出蜷曲的五维时空中只有一个膜存在。

**相对论性量子场论**：**狭义相对论**与量子场论的联姻，其中的量子场为最根本的客观实在。基本粒子为场的量子，可以产生或消灭。因此这个理论可以用来描述基本粒子相互作用过程中的粒子产生和消灭。

**相对论**：空间和时间的概念是相对的而不是绝对的。相对论可以追溯到伽利略，但我们通常使用这个术语指的都是爱因斯坦的狭义相对论和广义相对论这两个理论。狭义相对论是所有物理过程基本的时空性质。狭义相对论基于两个原理。首先，处于匀速直线运动的封闭系统中观测者，不能通过任何实验判断系统处于静止还是匀速运动。第二点，信号的传播速度有一个极限。广义相对论基于**等价原理**；根据广



义相对论，引力是与**时空弯曲**联系在一起的。

**重正化**：在实际的**相对论性量子场论**计算中，某些过程的结果将是无限大。人们重新定义诸如电子的电荷、质量这样的一些量，使得无限大不出现在最后的物理结果中，这样的过程就是重正化。某些理论，比如**量子电动力学**和**量子色动力学**都可以得到有限的结果，因此是可重正化的理论；而引力的量子理论是不可重正化的，只能给出无限大的结果。

**静止质量**：基本粒子的固有质量；如果一个粒子相对我们处于静止状态，则我们测得的就是静止质量。静止质量为零的粒子以光速运动；静止质量不为零的粒子不能以光速运动。

**标量场**：自旋为零的场，希格斯玻色子就是标量场的量子。同样为标量场量子粒子的还有假设存在的**半径子**。

**S对偶**：具有**大耦合常数**的弦论与具有**小耦合常数**的弦论可以给出相同的物理，这样的**对称性**称为S对偶。

**标量电子**：电子的超对称伴。

**奇异性**：时空中某个物理定律破坏的点。可以认为是时空布景上的一个小洞。

**SLAC**：斯坦福直线加速中心。SLAC利用高能电子束探索物理。人们最先在SLAC**粒子加速器**上发现质子内部的**夸克**结构。粲夸克与 $\tau$ 轻子也是在SLAC上发现的。

**标量轻子**：轻子的超对称伴。例如，**标量电子**就是电子的超对称伴；**标量中微子**为中微子的超对称伴。

**标量中微子**：中微子的超对称伴。

**孤波（孤子）**：连续介质中的定域分布，可以长距离传播而不改变自身形状及振幅。孤波在很多方面都像一个粒子。

**时空**：根据狭义相对论，时间和空间并不彼此独立；我们生活在四维时

空中——三维空间和一维时间的组合。

**特殊么正群 ( $N$  阶),  $SU(N)$ :** 一种李群, 描述一种可以将  $N$  个对象转到彼此的抽象对称性。 $SU(2)$  群和  $SU(3)$  群在粒子物理中扮演重要角色。

**自旋:** 粒子的量子力学性质, 在某些方面与熟悉的自旋概念很类似。量子粒子具有内禀自旋。选取普朗克常数为单位时, 自旋要么为整数 (此种情况的粒子为玻色子) 要么为奇数 (此种情况的粒子为费米子)。

**对称性自发破缺:** 某些系统可以用具有某种对称性的方程描述, 但其稳定解却不具有对称性, 这样的系统发生对称性自发破缺。具有对称性的态不稳定, 于是自发破缺到稳定但是不对称的态。比如, 针尖向下的针具有转动对称性, 但这样的系统不稳定; 针终将倒下, 于是转动对称性自发破缺。

**标量夸克:** 夸克的超对称伴。

**标准模型:** 基于  $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$  规范群的一组场论。用以描述除引力之外的三种相互作用 (电磁相互作用、弱相互作用以及强相互作用)。

**弦论:** 也称为超弦理论。弦论假设大自然中的基本客体是一维的弦而不是零维的点粒子。利用弦论, 可以发展出一套将引力的量子理论与三种非引力的相互作用统一在一个框架下的理论。

**强相互作用:** 发生在具有色荷的物体之间的相互作用。强相互作用通过交换胶子传递。强力将夸克束缚在一起形成强子; 强力的间接效应是将质子和中子束缚于原子核中的核力。描述强相互作用的相对论性量子场论是量子色动力学。

**超引力:** 当将超对称性视作局域对称性时, 广义相对论——或者说引力就会自动出现。原始的超引力理论中只有两个场——引力子与引力微



子——扩充的超引力理论可以描述更加真实的大自然。超引力理论是弦论的低能极限。

**超级神冈中微子探测器：**大型充水探测器，用于探索中微子、宇宙线以及某些特定现象——比如大统一理论中预言的质子衰变与磁单极子的存在。

**超弦理论：**见弦论。

**超对称 (SUSY)：**假设存在于费米子（半整数自旋）与玻色子（整数自旋）之间的对称性。

**对称性：**变换下的不变性。如果一个系统按某种方式变换时形态不变，则我们称该系统具有对称性。

**快子：**一种假想粒子，具有超光速的速度。如果某个理论中包含快子，则该理论通常是不自洽的。

**$\tau$ 子：**三代轻子中最重的一个。

**T对偶：**紧致在小圆环上的弦论与紧致在大圆环上的弦论可以给出相同的物理，这样的对称性称为S对偶。

**太电子伏 (TeV)：**万亿电子伏 ( $10^{12}$ )；相当于 1000 GeV。对于世界上最大的粒子加速器来说，这是一个很方便的能量单位。在这样的加速器上产生的质子能量大约是 1 TeV 的量级，大型强子对撞机上质子碰撞的总能量为 14 TeV。

**热力学：**研究物理系统中有关热量的科学。热力学关注功、能以及熵这样一些物理量。

**时间膨胀：**根据狭义相对论，处于相对运动中的观测者时间减慢。

**不确定原理：**量子力学原理。某几对物理量（比如坐标/动量又或能量/时间）的乘积永远不能精确测定，如果我们精确地测定其中一个量的值，会导致另一个物理量的测定值更加的不精确。不确定原理导致了完全不同于经典物理的量子效应出现。

**矢量场**：自旋为 1 的场。电磁场就是矢量场。

**虚粒子**：费曼图中的“内线”粒子，其质量不同于真实的自由粒子。比如，**虚光子**可以具有质量；这就与是实光子相反，实光子是没有质量的。虚光子的发射与吸收用**相对论性量子场论**描述，所有的基本粒子相互作用以其为基础。

**波函数**：坐标与时间的函数。某种波动方程的解。作为薛定谔波动方程——**量子力学**的基本方程——解的波函数，其平方有特殊意义：代表几率密度。

**波长**：连续波峰、波谷或者任意一处完全相同的位置之间的间隔。

**波粒二相性**：**量子力学**的一个基本性质，**电子**之类的粒子同时具有波动和粒子的性质。

**W 玻色子**：自旋为 1 的基本粒子，**轻子**与**夸克**通过交换 W 玻色子（以及 Z 玻色子）传递弱相互作用。W 玻色子的电荷为 +1 或 -1；静止质量为 81.8 GeV。

**弱相互作用**：带有弱荷的物体之间的相互作用，所有的基本费米子都参与弱相互作用；弱相互作用是已知的唯一一种中微子参与的相互作用。弱相互作用通过传递 W 玻色子与 Z 玻色子传递。高能时，弱相互作用由**电弱理论**描述，电弱相互作用将弱相互作用与电磁相互作用统一起来。

**弱超荷**：电弱相互作用基于  $SU(2) \times U(1)$  规范对称性的自发破缺。其中，U(1) 是弱超荷的群，与电荷有直接关系。

**弱同位旋**：电弱相互作用基于  $SU(2) \times U(1)$  规范对称性的自发破缺。其中，SU(2) 是弱同位旋的群，可以视作某种类型的荷。

**弱混合角**：电弱相互作用理论中的基本参数。标准模型中，这些参数的值要用手放到理论中；而**大统一理论**可以预言这些参数的值。

**WIMP**：有质量的弱相互作用粒子。假设这样一些粒子的存在是为了解



释所谓的“冷暗物质”（宇宙中的大量物质都是尚未探测到的形式构成，这些物质称为暗物质），这些粒子与普通物质除了引力相互作用外几乎无相互作用。

**W 微子：**W 玻色子的超对称伴。

**世界线：**描绘点粒子穿过时空时轨迹的一维线。

**世界面：**描绘弦穿过时空时轨迹的二维面。

**X 玻色子：**SU(5) 大统一理论中的假想规范玻色子。X 玻色子可以将一个夸克变成一个轻子，反之亦然。X 玻色子带色荷，电荷为  $-4/3$ 。

**Y 玻色子：**SU(5) 大统一理论中的假想规范玻色子。Y 玻色子可以将一个夸克变成一个轻子，反之亦然。Y 玻色子带色荷，电荷为  $-1/3$ 。

**Z 玻色子：**自旋为 1 的基本粒子，轻子与夸克通过交换 Z 玻色子（以及 W 玻色子）传递弱相互作用。Z 玻色子电中性；静止质量为 92.6 GeV。

**Z 微子：**Z 玻色子的超对称伴。

# 索引

## A

- Abrikosov, A. A. 阿列克谢·阿布里科索夫, 191
- Adelberger, E. G. 艾德尔博格, 265, 277
- AdS/CFT correspondence AdS/CFT 对应, 236, 240~242
- Akulov, P. 阿库洛夫, 128
- Albrecht, A. J. 安德里亚·奥布赖克特, 279
- allegory of the cave 洞穴寓言, 4, 5
- Anderson, C. D. 卡尔·安德森, 69
- Anderson, P. W. 菲利普·安德森, 103
- anthropic principle 人存原理, 284
- anti-de Sitter spacetime 反德·西特时空, 237, 240, 272
- Antoniadis, I. 伊格内提奥斯·安东尼

亚迪斯, 245, 249, 255

- Arkani-Hamed, N. 尼纳·阿卡尼-哈米德, 249~257, 259, 262, 263, 265, 266, 268~270, 274, 278
- Ashtekar, A. 艾伯埃·艾什特卡, 155
- Auger, P. V. 皮埃尔·奥杰, 261
- Axion 轴子, 108

## B

- Bach, J. S. 巴赫, 14
- Bachas, C. P. 康斯坦丁·巴卡斯, 225
- Banks, T. 托马斯·班克斯, 205
- Bars, I. 伊特泽克·巴斯, 211
- baryon 重子, 65
- Bekenstein, J. D. 雅克布·贝肯斯坦, 218~221, 223, 224, 230
- Bergshoeff, E. A. 艾里克·博格肖夫, 209



- Berners-Lee, T. 蒂姆·贝纳斯-李, 58  
 beta decay  $\beta$  衰变, 68  
 Big Bang 大爆炸, 1, 46, 57, 107, 246, 259, 279, 280  
 black hole 黑洞, 207, 215 ~ 217, 219 ~ 223  
 black hole entropy 黑洞熵, 223  
 Bogomolny, E. B. 尤金·博格莫涅, 193  
 Boltzmann, L. 路德维格·波尔兹曼, 217, 218, 223, 226 ~ 228  
 Bose, S. N. 萨地扬德拉·玻色, 62  
 boson 玻色子, 62 ~ 64, 72  
 Bousso, R. 拉斐尔·波索, 235  
 BPS state BPS 态, 193, 214, 223  
 Brandenberger, R. H. 罗伯特·布兰登博格, 200  
 brane 膜, 202, 204 ~ 212, 243, 246, 248, 250, 255 ~ 257, 259, 262, 267, 269, 271 ~ 274, 278 ~ 283  
 brane scan 膜的扫描图, 210  
 branon 膜子, 269  
 Brink, L. 拉斯·布林克, 165  
 Brookhaven National Laboratory 布鲁克海文国家实验室, 82  
 Brout, R. 罗伯特·布劳特, 103  
 bulk 体空间, 248 ~ 250, 255 ~ 257, 259, 262, 266, 267, 271, 273, 279, 280, 282, 283
- C**
- Calabi, E. 尤奇尼奥·卡拉比, 171  
 Calabi-Yau manifold 卡拉比-丘流形, 171, 173, 176, 199, 224, 249, 283  
 Callan, C. G. 科蒂斯·卡兰, 224  
 Candelas, P. 菲利普·堪德拉斯, 172  
 Carnot, S. N. L. 萨迪·卡诺, 217  
 Cavendish, H. 亨利·卡文迪许, 263  
 CERN 欧洲核子研究中心, 52, 53, 56, 58, 106, 277  
 charge 荷, 59 ~ 61, 76, 80, 81, 86, 88 ~ 91, 99, 115, 124, 136, 215  
 chirality 手征性, 20, 98  
 chiality problem 手征性疑难, 152  
 Clausius, R. J. E. 鲁道夫·克劳修斯, 217, 223, 226  
 Cleveland, A. N. 安德鲁·克里夫兰, 41  
 color 色, 89 ~ 92, 94, 95, 110, 190, 277  
 compactification 紧致化, 145 ~ 152, 166, 167, 170 ~ 179, 196 ~ 200, 204, 205, 211, 222 ~ 224, 238, 248, 249, 269 ~ 271, 283  
 confinement 禁闭, 67, 94, 188 ~ 191, 193, 194, 242  
 conformal symmetry 共形对称性, 161  
 conservation law 守恒律, 19, 20  
 cosmic ray 宇宙线, 259  
 cosmological constant 宇宙常数, 239  
 coupling constant 耦合常数, 81, 87, 88, 92 ~ 96, 101, 110, 115, 117, 118, 125, 128, 130, 136, 176, 177, 190, 192, 195, 196, 201, 202, 204  
 Cowan Jr, C. L. 克莱德·科文, 68  
 CP symmetry CP 对称性, 108  
 CPT symmetry CPT 对称性, 277  
 Cremmer, E. 尤金·克莱默, 151, 202



## D

- D-brane D-膜, 213, 214, 221~223, 235, 243, 247
- Dai, J. 戴锦 (音译), 212
- dark energy 暗能量, 282
- dark matter 暗物质, 131, 255, 256
- Das, S. R. 萨美特·达斯, 224
- de sitter spacetime 德·西特时空, 237
- de sitter 德·西特, 237
- Descartes, R. 瑞尼·笛卡儿, 21
- Dienes, K. R. 凯斯·迪恩尼斯, 255
- dilaton 伸缩子, 146, 148, 149, 176, 177, 195, 266
- Dimopoulos, S. 萨瓦斯·迪莫普洛斯, 249~257, 259, 261~263, 265, 266, 268~270, 274, 278
- Dirac field 狄拉克场, 60
- Dirac P. A. M. 保罗·狄拉克, 45, 69, 184, 185, 209
- Dirichlet boundary conditions 狄利克雷边界条件 212
- Dirichlet, J. 狄利克雷, 213
- Duality 对偶性, 182, 184, 188, 190, 192~195
- Dudas, E. 艾米利恩·杜达斯, 255
- Duff, M. J. 迈克尔·达弗, 202, 211
- Dvali, G. 乔奇·德瓦利, 249~257, 259, 262, 263, 265, 266, 268~270, 274, 278

## E

- Einstein, A. 阿尔伯特·爱因斯坦, 2, 3, 8, 21~23, 30, 31, 34, 35, 37,

- 38, 44, 47, 62, 132, 137, 141~144, 182, 202, 215, 216, 237, 239, 274
- ekpyrotic universe 火宇宙, 278, 280~282
- electromagnetic field 电磁场, 44
- electromagnetism, see QED 电磁学, 见“QED”条目
- electron 电子, 52, 61, 65, 68, 69, 81, 86~88, 129, 161
- electron neutrino, see neutrino 电子中微子, 见“中微子”条目
- electron volt (eV) 电子伏, 52
- electroweak theory 电弱理论, 136
- Englert, F. 弗朗哥斯·恩格勒特, 103
- entropy 熵, 217~219, 226
- equivalence principle 等价原理, 35~38, 182
- Escher, M. C. 莫里兹·埃舍尔, 14, 238
- event horizon 视界, 216, 218~220, 223, 230~232, 236
- exceptional groups 例外群, 28, 111
- exclusion principle 不相容原理, 62, 63, 90, 137
- extremal black hole 临界黑洞, 222

## F

- Fedorov, E. S. 伊弗格拉夫·费德洛夫, 13
- Feng, J. L. 乔纳森·冯, 261
- Fermi, E. 恩里克·费米, 62, 68, 111, 112
- fermilab 费米实验室, 52, 56, 72, 277
- fermion 费米子, 62~64



Ferrara, S. 瑟吉奥·费拉拉, 135, 138  
 Feynman diagram 费曼图, 85  
 Feynman, E. P. 理查德·菲利普·费曼, 3, 44, 85, 86, 88  
 Fischler, W. 威利·费什勒, 205  
 flavor 味, 65, 66, 70, 72, 73, 75, 95, 96  
 Freedman, D. Z. 丹尼尔·弗里曼, 135, 138  
 Fritsch, H. 哈罗德·弗里奇, 123

## G

Gabor, D. 丹尼斯·盖伯, 233  
 Galilei, G. 伽利略, 21~24  
 Galois, E. 伊瓦里斯特·伽罗瓦, 27  
 gauge boson 规范玻色子, 100~103, 110, 114, 116, 124, 133~136, 154, 164, 178, 185, 248  
 gauge field 规范场, 83, 90, 134, 135, 172, 185, 249,  
 gauge invariance 规范不变性, 60, 85, 89, 99, 106, 110, 133, 136, 149, 150, 153, 167, 168, 178  
 gauge theory 规范理论, 84, 85, 89, 94, 99, 100, 109, 111, 114, 138, 146, 150, 166, 167, 171, 178, 179, 193, 196, 214, 225, 236, 240~244, 250, 255  
 gedanken experiments 理想实验, 2, 4  
 Gell-Mann, M. 穆雷·盖尔曼, 65, 70, 90  
 general relativity, see relativity 广义相对论, 见“狭义相对论”条目  
 Georgi, H. 霍华德·乔奇, 114,

118, 123  
 Gherghetta, T. 汤尼·戈尔菲塔, 225  
 Giddings, S. B. 斯蒂芬·吉丁兹, 261, 268  
 Glashow, S. L. 谢尔顿·格拉肖, 99~101, 106, 114, 169, 174, 175  
 Gliozzi, F. 费迪南德·格利奥兹, 164  
 Global Positioning System 全球卫星定位系统, 7, 30~33, 42, 200  
 glueball 胶球, 76, 244  
 gluino 胶微子, 129, 133  
 gluon 胶子, 90~92, 95, 110, 129, 130  
 Goldberger, W. D. 沃尔特·古德博格, 273  
 Golfand, Y. A. 尤里·高尔芳, 127  
 Gorkov, L. P. 列夫·高科夫, 191  
 Goto, T. 后藤哲夫, 156, 160  
 grand unified theory 大统一理论 (GUT), 114~121, 123~126, 153, 185, 188, 255  
 gravitational redshift 引力红移, 37  
 gravitino 引力微子, 135  
 graviton 引力子, 47, 135, 154, 163, 257, 266, 267  
 gravity 引力, 3, 7, 28, 34~38, 46, 47, 79, 112, 118, 119, 126, 130, 135~137, 141~143, 146~155, 158, 163~172, 177, 178, 202, 206, 213~217, 220, 221, 226, 231, 232, 235~241, 243, 244, 248~258, 262~266, 269~275, 284, 286  
 Green, M. B. 布赖恩·格林, 165, 167, 169, 181, 211, 225

Greenberg, O. W. 奥斯卡·格林斯伯格, 277  
 Green, B. R. 布赖恩·格林, 199  
 Gross, D. J. 戴维·格罗斯, 93, 169  
 group theory 群论, 25, 27  
 Gubser, S. S. 斯蒂文·古博斯尔, 241  
 Gursev, F. 费泽·格西, 124  
 Guth, A. H. 艾伦·古斯, 123, 279

## H

hadron 强子, 65  
 Harvey, J. A. 杰弗里·哈维, 169  
 Hawking radiation 霍金辐射, 224  
 Hawking, S. W. 斯蒂芬·霍金, 218~221, 223, 224, 230, 262  
 Heckel, B. R. 布雷恩·赫克尔, 265, 277  
 Heraclitus 赫拉克利特, 6  
 heterotic string, see superstrings 杂化弦, 见“超弦”条目  
 hierarchy problem 等级问题, 125, 126, 128, 133, 138, 254, 255, 257, 259, 269, 270, 272, 274, 286  
 Higgs boson 希格斯玻色子, 彼得·希格斯, 102~104, 124~126, 134, 274, 285  
 Higgs, P. W. 彼得·希格斯, 102  
 higgsino 希格斯微子, 131  
 Horava, P. 哈罗瓦, 201, 248, 249, 272  
 holographic principle 全息原理, 232, 235, 240, 241, 243  
 Horowitz, G. T. 加里·霍洛维茨, 172, 224

Howe, P. S. 保罗·豪, 211  
 Hughes, J. 詹姆斯·休斯, 209  
 Hull, C. M. 克利斯托夫·赫尔, 195  
 Huxley, T. H. 托马斯·赫胥黎, 3, 121

## I

Inami, T. 稻见武夫, 211  
 inflation 暴涨, 123, 279, 281, 282  
 isospin 同位旋, 100

## J

Julia, B. 伯纳德·朱利亚, 151, 202

## K

Kaluza, T. F. E. 西奥多·卡鲁扎, 142~145, 149, 152  
 Kaluza-Klein theory 卡鲁扎-克莱因理论, 145, 149, 152, 162, 171, 176, 196, 209  
 Kennedy-Thorndike experiment 肯尼迪-桑代克实验, 276  
 Khoury, J. 贾斯汀·霍里, 279, 280  
 Kikkawa, K. 吉川圭二, 196  
 Klebanov, I. R. 伊戈·克莱班诺夫, 241  
 Klein, O. 奥斯卡·克莱因, 143~149, 152, 245  
 Knobel, R. 罗伯特·诺布尔, 41  
 Kostelecký, V. A. 艾伦·克斯特莱奇, 275~277

## L

Landsberg, G. L. 格雷戈·兰兹伯格,



- 261, 268
- Large Electron-Positron Collider 大型正负电子对撞机 (LEP), 106, 266, 269, 285
- Large Hadron Collider 大型强子对撞机 (LHC), 52, 58, 107, 133, 134, 176, 261, 268, 272, 274, 284, 286
- Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory 激光干涉引力波观测站 (LIGO), 263, 264
- Lederman, L. M. 里昂·莱德曼, 69, 72
- Leigh, R. G. 罗伯特·利, 212
- leptons 轻子, 65, 80
- Lie groups 李群, 27, 124
- Lie, M. S. 索菲斯·李, 27, 28
- lightest superasymmetric particle 最轻超对称粒子 (LSP), 131, 256
- Likhtman, E. P. 伊夫金·利特曼, 127
- Linde, A. 安德烈·林德, 279
- Liu, J. T. 刘君, 209
- loop quantum gravity 圈量子引力, 154, 155
- lorentz symmetry 洛伦兹对称性, 23, 24, 59, 274~277
- lorentz symmetry violation 洛伦兹对称性破坏, 275~277
- Lorentz, H. A. 亨德里克·洛伦兹, 23
- M**
- M-theory M 理论, 181, 182, 250, 272, 275
- magnetic monopole 磁单极子, 182~185, 188
- Maldacena, J. M. 胡安·马德西纳, 224, 235, 236, 238, 204~243, 272
- Mandlestam, S. 曼德斯坦姆, 188
- Martinez, E. J. 埃米尔·马丁内奇, 169
- Mathur, S. D. 斯米尔·马萨, 224
- Matrix model 矩阵模型, 206
- Maxwell, J. C. 詹姆斯·克拉克·麦克斯韦, 39, 44, 1014, 142, 182, 184
- Meissner effect 迈斯纳效应, 191
- Messner W. H. 沃尔塞·迈斯纳, 191
- meson 介子, 65, 161
- Michelson-Morley experiment 迈克尔逊-莫雷实验, 276
- Miller, D. J. 戴维·米勒, 104, 105
- Minkowski, H. 赫曼·闵可夫斯基, 22, 143
- Minkowski, P. 彼得·闵可夫斯基, 123
- mirror manifold 镜像流形, 199
- mirror symmetry 镜像对称性, 199
- moduli 模, 177
- monopole 单极子, 191
- Montonen, C. 克劳斯·曼坦宁, 190, 192
- muon  $\mu$  子, 69, 72
- muon neutrino, see neutrino  $\mu$  子中微子, 见“中微子”条目
- N**
- Nakano, T. 中野董夫, 70
- Nambu, Y. 南部阳一郎, 156, 160
- Neddermeyer, S. H. 塞斯·内德梅耶, 69

neutralino 中性微子, 131, 132  
 neutrino 中微子, 68, 69, 81, 257  
 electron neutrino 电子中微子, 68, 69  
 muon neutrino  $\mu$  子中微子, 69  
 neutron 中子, 66, 69, 91  
 Neveu, A. 安德烈·纳瓦尔, 128, 161  
 Newton, I. 艾萨克·牛顿, 8, 38, 253, 257, 263, 266  
 Nielsen, H. B. 霍奇尔·尼尔森, 156, 160  
 Nishijima, K. 西岛和彦, 70  
 Noether's theorem 诺特定理, 17, 19, 23, 60  
 Noether, E. 艾米·诺特, 19, 161  
 Nordström, G. 古纳·诺斯托姆, 143, 149

## O

Ochsenfeld, R. 罗伯特·奥森菲尔德, 191  
 Olive, D. I. 戴维·奥利弗, 164, 190, 192  
 Ovrut, B. A. 伯特·奥弗拉特, 279, 280

## P

parity 宇称, 20, 108, 277  
 particle accelerator 粒子加速器, 52  
 Pauli, W. 沃尔夫冈·泡利, 20, 68, 132, 148  
 Peccei, R. D. 罗伯特·派西, 108  
 pentaquark 五夸克态, 67  
 Perl, M. 马丁·佩尔, 71, 72  
 perturbation theory 微扰论, 87, 88,

92~94, 136, 158, 160, 167, 176, 189, 192, 193, 196, 202, 204, 242  
 photino 光微子, 129, 131  
 photon 光子, 62, 129  
 Pierre Auger Cosmic Ray Observatory 皮埃尔·奥杰宇宙线天文台, 260~262  
 pion  $\pi$  子, 65, 66, 70, 161  
 Planck constant 普朗克常数, 40  
 Planck length 普朗克长度, 47, 148, 247  
 Planck mass 普朗克质量, 168, 217  
 Planck satellite 普朗克巡天仪, 282  
 Planck scale 普朗克标度, 249  
 Plato 柏拉图, 4~6, 10  
 Platonic solids 柏拉图立体, 10  
 Plesser, M. R. 罗森·普莱舍尔, 199  
 Poincaré symmetry 庞加莱对称性, 127  
 Poincaré, J. H. 庞加莱, 127  
 Politzer, H. D. 戴维·普利策, 93  
 Polyakov, A. M. 亚历山大·玻利雅科夫, 185~188, 244  
 Pope, C. N. 克里斯托夫·波普, 211  
 positron 正电子, 45, 75, 76  
 Prasad, M. K. 曼诺·普拉萨德, 193  
 Price, J. C. 约翰·普莱斯, 265, 266  
 proton 质子, 50, 52, 53, 65, 66, 69, 70, 91, 93, 161  
 proton decay 质子衰变, 117

## Q

quantum chromodynamics 量子色动力学 (QCD), 81, 89~93, 95, 109,



110, 136, 154, 163, 188, 190, 194,  
241~244  
quantum electrodynamics 量子电动力  
学 (QED), 80, 84~94, 104, 109,  
136, 137, 154  
quantum field theory 量子场论, 44  
quantum mechanics 量子力学, 43  
quarks 夸克, 65~67, 69, 80, 185  
Quinn, H. R. 海伦·奎因, 108, 118

## R

radion 半径子, 273  
Ramond, P. M. 皮埃尔·雷蒙德, 124,  
128, 161  
Randall, L. J. 莉萨·兰德尔, 270~  
274, 278  
Randall-Sundrum scenario 兰德尔-山  
德拉姆方案, 269~274  
Reines, F. 弗雷德里克·里因斯,  
68, 71  
relativistic quantum field theory 相对  
论性量子场论, 43, 44  
relativity 相对论  
    general theory of relativity 广义相对  
    论, 3, 7, 8, 32, 34, 123, 132, 142,  
    146, 177, 182, 215, 216, 237, 239  
    special theory of relativity 狭义相对  
    论, 3, 8, 17, 21, 23, 32, 34, 43  
renormalization 重正化, 88, 89,  
93, 136,  
rest mass 静止质量, 59  
Rohm, R. 瑞恩·罗姆, 169  
Rosenbaum, T. F. 托马斯·罗森鲍  
姆, 41

Rovelli, C. 卡罗·鲁瓦利, 155  
R-parity R宇称, 131  
Rubakov, V. A. 瓦拉里·鲁巴柯  
夫, 245

## S

S-duality S对偶性, 195, 196, 201  
Sakharov, A. 安德烈·萨哈罗夫, 120  
Salam, A. 阿卜杜斯·萨拉姆, 101,  
102, 106, 128, 169  
Samuel, S. 斯图尔特·萨缪尔, 275  
Scherk, J. 乔·舍尔克, 151, 163,  
164, 202  
Schrödinger, E. 欧文·薛定谔, 42  
Schwartz, M. 迈尔文·施瓦茨, 69  
Schwarz, J. H. 约翰·施瓦茨, 128,  
161, 163~165, 167, 169, 181,  
211, 225  
Schwarzschild, K. 卡尔·施瓦茨柴尔  
德, 215  
Schwinger, J. S. 朱利安·施温格,  
88, 99  
Scott Russell, J. 约翰·司科特·拉塞  
尔, 185, 186  
Seiberg, N. 内森·塞伯格, 192~  
194, 235  
selectron 标量电子, 129  
Sen, A. 艾索科·森, 192  
Sezgin, E. 厄津·塞兹金, 226~228  
Shannon, C. E. 克劳德·香农, 226  
~228  
Shapere, A. L. 阿尔弗莱德·夏皮  
尔, 261  
Shaposhnikov, M. E. 米沙·沙波什尼

- 科夫, 245
- Shenker, S. H. 斯蒂芬·森科, 205
- Sikivie, P. 皮埃尔·斯奇威, 124
- singularity 奇异性, 216
- slepton 标量轻子, 134
- Smolin, L. 李·斯默林, 155
- sneutrino 标量中微子, 129
- SO(10), 123
- soliton 孤子, 孤波, 185, 186, 188
- Sommerfield, C. M. 查尔斯·索莫菲尔  
德, 193
- Sorkin, R. D. 拉菲尔·索尔津, 230
- special relative, see relativity 狭义相对  
论, 见“相对论”条目
- spin 自旋, 61
- squark 标量夸克, 133, 134
- Standard Model 标准模型, 7, 8, 78,  
80, 85~96, 101~115, 125, 128,  
129, 138, 146, 150, 151, 153, 154,  
158, 160, 166, 169, 173, 178, 179,  
188, 194, 206, 248, 255, 256, 266,  
269, 276, 285, 286
- Standard Model Extension 扩充的标准  
模型, 277
- Starobinsky, A. A. 阿列克谢·斯塔罗  
宾斯基, 123, 279
- Steinberger, J. 杰克·斯坦博格, 69
- Steinhardt, P. J. 保罗·斯坦哈特,  
279, 280, 282
- Stelle, K. S. 凯尔劳格·斯戴勒, 211
- Strathdee, J. 约翰·斯特拉思蒂, 128
- string tension 弦张力, 157
- string theory, see superstrings 弦论,  
见“超弦”条目
- Strominger, A. E. 安德鲁·斯特劳明  
格, 172, 211, 221~224
- strong interaction 强相互作用, 70,  
81, 83, 85, 89~95
- SU(5) grand unification SU(5) 大统一  
理论, 114, 115, 121, 123
- Sundrum, R. 拉曼·山德拉姆, 270~  
274, 278
- Superconductor 超导体, 191
- Supergravity 超引力, 135, 137, 153
- Supernova 超新星, 258
- Superstrings 超弦, 153~180
- Heterotic 杂化, 169, 170, 196,  
198, 201, 204, 205, 211, 213, 248
- type I I 型, 196, 201
- type II A II A 型, 201, 202, 204
- type II B II B 型, 195, 196,  
201, 238
- supersymmetry 超对称 (SUSY), 127~  
129, 131~134, 153, 193, 204, 285
- Susskind, L. 莱昂纳德·萨斯金, 156,  
160, 205, 226, 235, 243
- symmetry 对称性, 10~12, 14
- ## T
- T-duality T 对偶, 196
- Tabletop gravity experiments 桌面上  
的引力实验, 263
- tachyon 快子, 164
- tau  $\tau$  子, 72
- tau neutrino, see neutrino  $\tau$  子中微子,  
见“中微子”条目
- Tevatron, 52, 72, 133, 176, 266~268
- thermodynamics 热力学, 217, 219,



228~232

Thomas, S. 斯科特·托马斯,  
261, 268

Thomson, J. J. 汤姆生, 65

't Hooft, G. 赫拉尔杜斯·特霍夫特,  
93, 104, 185~188, 190, 194, 225,  
226, 232, 235, 242, 243

time reversal 时间反演, 277

Tomonaga, S-I. 朝永振一郎, 88

Townsend, P. K. 保罗·唐森,  
195, 209Turok, N. G. 内尔·图罗克, 279,  
280, 282

## U

uncertainty principle 不确定性原理,  
40, 42, 47, 119, 144, 201, 220

## V

Vafa, C. 卡姆兰·瓦法, 200, 221~223

Van Nieuwenhuizen, P. 彼得·纽文惠  
泽, 135, 138Veneziano, G. 加布里埃尔·维尼齐亚  
诺, 156

Volkov, D. V. 德米特里·沃可夫, 128

von Neumann, J. 约翰·冯·诺伊  
曼, 227

## W

W boson W 玻色子, 95, 96, 100,  
101, 103, 119

wave-particle duality 波粒二相性, 41

wavefunction 波函数, 42, 45, 63

weak hypercharge 弱超荷, 100

weak interaction 弱相互作用, 70, 73,  
81, 95, 96, 99

weak isospin 弱同位旋, 99, 100

weak mixing angle 弱混合角, 115

Weeks, J. A. 杰弗里·威克斯, 10

Weinberg, S. 史蒂文·温伯格, 3, 44,  
101, 102, 106, 118, 169

Wess, J. 朱利叶斯·韦斯, 128

Wheeler, J. A. 约翰·惠勒, 38

Wigner, E. P. 尤金·魏格纳, 59, 62

Wilczek, F. 弗兰克·维尔切克, 93

Wino W 微子, 129

Wise, M. B. 马克·韦斯, 273

Witten, E. 爱德华·威滕, 150, 152,  
165, 172, 181, 193~196, 201~204,  
235, 241, 248, 249, 272

world line 世界线, 22, 157, 161

world sheet 世界面, 157, 160, 162

World Wide Web 万维网, 58

## X

X boson X 玻色子, 114, 119

## Y

Y boson Y 玻色子, 114

Yamasaki, M. 山崎正树, 196

Yau, S. T. 丘成桐, 171

Yoneya, T. 米谷民明, 163

## Z

Z boson Z 玻色子, 95, 96, 103

Zino Z 微子, 131

Zumino, B. 布鲁诺·祖米诺, 128

Zweig, G. 乔治·茨维格, 65



## 参考书目

本书面向的是一般读者，因而没有必要将本书中提到的原始科研论文列出。这些论文通常具有大量的数学推演与计算。不管怎样，对原始论文感兴趣的读者可以去访问 <http://arxiv.org>，通过检索作者和写作日期，就可以在物理学和数学的电子书籍分类下查阅到所需要的原始文献。

世界上主要的粒子物理实验室都非常乐于解释他们正在进行的工作，在他们的网站中包含了大量有用信息和新闻。感兴趣的读者可以访问 <http://public.web.cern.ch/public/>（欧洲核子研究中心的网站）以及 <http://www.fnal.gov/>（费米实验室的网站）这样的一些网站。还有一个非常有用的粒子物理网站：<http://www.interactions.org/cms/>。

下面所列的书目推荐给那些有意于更进一步学习本书中所讨论的观点的读者。所有的这些书籍都适宜非数学专业读者阅读。



Oxford; Blackwell.

更高维度的最早普及类图书。所列的是一个老版本，新的版本正在发行中。

Adair, R. K., 1987. *The Great Design*. Oxford; OUP.

一本在介绍相对论和粒子物理思想方面非常不错的入门书。

Barrow, J. D. and Tipler, F. J., 1986. *The Anthropic Cosmological Principle*. Oxford; OUP.

假如你对物理学中的人存原理争论有兴趣，这本书提供了大部分观点的原始参考资源。

Bloom, A., 1991. *The Republic of Plato*. 2nd ed. New York; Basic Books.

可能是柏拉图著作最好的英文译本了。

Bryson, B., 2003. *A Short History of Nearly Everything*. New York; Broadway Books.

本书以布莱森 (Bryson) 惯常的一流技法、良好的组织结构，向读者传达了大量的科学知识。

Close, F. E., 2000. *Lucifer's Legacy*. Oxford; OUP.

一本关于物理学中对称性和不对称性的通俗易懂的书。

Close, F. E., Marten, M. and Sutton, C., 1987. *The Particle Explosion*. Oxford; OUP.

一本带有漂亮插图的介绍粒子物理学的标准模型的入门书。

Epstein, L. C., 1985. *Relativity Visualized*. San Francisco; Insight Press.

一本相对论方面有趣的入门书。

Froggatt, C. and Nielsen, H., 1991. *Origin of Symmetries*. Singapore; World Scientific.

包括了超对称和超弦方面的重要论文，其中的很多都是我在本书中

提到过的。显然，阅读这样的一本书并不容易，但是这本书却能够清晰地描述对称性在物理学中的重要地位。

Geroch, R., 1978. *Relativity from A to B*. Chicago: University of Chicago Press.

一本关于广义相对论概念全面而又通俗易懂的入门书。

Greene, R., 1999. *The Elegant Universe*. New York: Vintage.

关于超弦理论最好的入门书，近年来最流行的物理书籍之一。

Kaku, M., 1994. *Hyperspace*. Oxford: OUP.

对更高的维度和超弦理论的说明清晰易懂。

Lederman, L. M. and Schramm, D. N., 1989. *From Quarks to the Cosmos*. New York: Scientific American Library.

关于粒子物理方面的读物，有漂亮的插图说明。

Lilley, S., 1981. *Discovering Relativity for Yourself*. Cambridge: CUP.

相对论的最好入门书之一。

Smolin, L., 2000. *Three Roads to Quantum Gravity*. Oxford: OUP.

清晰地讲解了有关量子引力的有关内容。

Weinberg, S., 1992. *Dreams of a Final Theory*. New York: Pantheon Books.

一本关于探索大自然的基本定律的书，其作者是最伟大的理论物理学家之一。

Wilczek, F. and Devine, B., 1987. *Longing for the Harmonies*. New York: Norton.

QCD 理论的创始者之一对 QCD 的精彩描述。

Will, C. M., 1993. *Was Einstein Right?* Oxford: OUP.

讲述了很多广义相对论的实验检验。

## 图片使用授权声明

非常感谢下列资源和图片版权所有者授权本书使用他们的图片。

图 8 来自于 Wilson A. Bentley 的珍藏。图 14 由美国宇航局 (NASA) 提供。

一些粒子物理和宇宙线实验室非常友好地允许在本书中使用他们的图片。汉堡的 DESY 惠允使用图 18、图 25 和图 37；犹他州 HiRes2 实验室惠允使用图 19；日内瓦的欧洲粒子物理研究所 (CERN) 惠允使用图 20、图 21、图 22、图 24、图 30、图 31、图 32、图 34、图 35、图 36、图 45、图 54、图 143 和图 131。费米实验室视像媒体服务中心 (Fermilab Visual Media Services) 惠允复制图 23，神冈天文台 (the Kamio Observatory)、宇宙线研究所 (Institute for Cosmic Ray Research, ICRR)、东京大学惠允复制图 62。图 110 由欧洲空间局 (the European Space Agency) 提供；图 129 由英澳天文台 (the Anglo-Australian Observatory) 提供；图 130 由皮埃尔·奥杰宇宙线天文台提供。一些大学和会议组织者也提供了

他们图片的使用权。图 40 由加州理工学院档案馆 (Archives, California Institute of Technology) 提供；普林斯顿大学交流办公室提供了图 72、图 142；加利福尼亚大学圣巴巴拉分校提供了图 82；赫瑞瓦特大学 (Heriot-Watt University) 提供了图 91；波斯敦大学提供了图 56；香港科技大学提供了图 94；乌特勒支理论物理所提供了图 27。图 139 由印第安纳大学提供；图 74 和图 34 取自艾伦·克斯特莱奇教授于 2001 年在印第安纳大学布鲁明顿分校组织的 CPT 与洛伦兹对称性第二次会议，保留版权。图 73 取自 2002 年在巴黎举行的 Cremmer-Gervais 酒会，保留版权。图 67 取自 2001 年纽约州立大学石溪分校举行的第 25 次超引力会议，保留版权。

承蒙以下四家公司惠允复制图片：图 15 由 Garmin Ltd 提供，图 113 由 Lucent Technologies 提供，图 115 由 Universal Hologram 提供，图 119——埃舍尔的“圆形极限 IV”由 ©2004 The M. C. Escher Company-Baarn-Holland 提供并保留版权。

最后我将感谢提供图片的个人以及那些乐于给予邮件答复的人们。我非常感谢 Sir Michael Berry 教授提供了图 92 的副本；Almut Mecke 提供了图 98 和图 107；John Vander Velde 教授提供了图 61；Oleg Lavrentovich 教授提供了图 104；Peter Ginter 提供了图 33；Mary Levin 提供了图 134；爱丁堡大学的 Peter Tuffey 提供了图 52；Burt Ovrut 教授提供了图 140；Neil Turok 教授提供了图 141；Philippe/Eurelios 提供了图 132。图 53 由 Georges Boixader 根据 David Miller 的原始创意绘制而成（访问网站 <http://www.hep.ucl.ac.uk/~djm/higgsa.html> 可查看原始版本）。Gary Friedman 惠允使用图



FIRST MOVER

## 第一推动

99 的副本（通过以下网址可以查看 Friedman 档案室，<http://www.friedmanarchives.com>）。Jean-Francois Colonna 惠允使用图 85 的副本（见 <http://www.lactamme.polytechnique.fr>）。Lubos Motl 博士惠允使用图 57、图 59、图 79、图 84、图 87、图 88、图 97、图 102、图 112、图 117、图 118、图 121、图 123、图 125、图 127、图 136 与图 137（访问 <http://schwinger.harvard.edu/~motl/PeoplePixWeb/> 可查看更多由 Lubos Motl 拍摄的弦论学家的照片）。

## 译后记

结束本书翻译工作之际，感慨良多，借此略抒胸怀。

首先必须向读者朋友们致歉。译者是首次进行这样一本非常专业的科普书的翻译工作，虽然尽量地查找资料，克服文化差异以及细节处的专业内容带来的麻烦，但是书中还是不可避免地存在着很多表述不够准确的地方，有不少地方未能很好地传达原作者的感觉。在真诚地向读者朋友们致歉的同时，译者欢迎读者朋友批评指正或进行有益的讨论，以更好地促进本人未来的工作。

接下来，作为本书的译者，我必须同读者朋友们分享一下在翻译本书的过程中我个人的一些体会和感触。

刚从编辑手中拿到本书的时候，我很兴奋，因为以前没有料到在一本科普书中会出现很多当前最新的理论进展，书中提到的一些工作，我甚至曾经读过原始的论文，因而有一种特别的亲切感。在翻译全书之前，自然要先通读几遍，很快地，我就会被其中深入浅出的讲解吸引了。比如读到 GPS 的原理那部



分内容时，感觉真是非常惊奇，原来我们学习过程中所接触到的广义相对论、量子力学等，竟然有这么“现实”的应用。越读到后来，最开始拿到本书时的那种亲切感就越强烈，标准模型、超对称，甚至额外维的 ADD、RS 等模型也都被收入本书，要知道，这两项工作都是 1998~1999 年才出现的（值得一提的是，关于 ADD、RS 这两个模型的原始论文，在短短的几年内被引用了超过 2000 次，由此可见，这些理论正是当前的研究热点所在）。本书的作者在几乎不使用数学的情况下，清晰地阐明了其中的物理知识，令人叹服。到了后面的章节，很多以前我没有听说过的最新理论进展，在本书中也一一提及。特别值得注意的是，本书的作者并没有空泛地罗列理论，而是详细地解释每一种理论试图告诉人们的是什么；更辅以实验证据，告诉大家物理学家们为什么会相信某某理论而不相信另外的理论。凡此种种，都在告诉我本书的确是一本关于当前理论物理最新进展的好书，专业读者与非专业读者都可以在阅读本书的过程中有所收获。将这样的一本科普读物介绍给读者，实在是一种荣幸。

但是，译书之余，我也想到了另外的一些事情。那就是，在这些优秀的科普读物的作者栏上，看到的都还是“洋名字”。令我们多少有些气馁但又不得不承认的一个事实是，国内原创的科普出版几乎一片空白。这种空白不仅仅表现在绝对数量少，更表现在科普书或文章的内容深度不够、前沿性远远滞后等方面。反观国外的科普出版，我们到 [amazon.com](http://amazon.com) 上稍稍搜索一下自己感兴趣的领域，就会发现大量的科普书；而且更值得我们借鉴的是，其中的很多书在内容上都是紧跟当前最新的



科学动向的。

我们的原创科普出版工作不理想，还体现在对当前世界最受瞩目的科学问题的关注不够，这一点值得我们全体从事相关工作的人思考。举个例子，当前基本粒子领域最重大的事情就是欧洲核子中心的大型强子对撞机（LHC）的即将运行，这一大型加速器的运行，将极大地促进当前基本粒子领域的科研工作，其成果注定意义非凡。如果 LHC 能够发现粒子物理标准模型中最后一个未发现的粒子——Higgs 粒子，那么标准模型就会完成最后一块拼图；如果不能发现这一粒子，那很有可能是更为重要的发现！这意味着人们现有的关于基本粒子世界的认识必须修改；而如果任何一种新的粒子都发现不了的话，很有可能意味着人们现在用于研究基本粒子的工具——量子场论——需要修改。可是，这样一件对基础物理学影响巨大的重大事件，在我国国内的报道却少之又少。笔者在读一篇专业领域的报告时发现，像 LHC 这样重大的科学事件，在国外是受到普遍关注的，纽约时报等著名报纸都曾先后报道过这一重大实验的进展情况，LHC 可以说是受到了世界重要媒体的全程关注。但是在我国国内，即使大学物理系的本科生、研究生，又有多少了解当前的这些进展呢？

我想造成这种现状的原因是多方面的。首先，人们普遍有一种倾向，即认为对科学研究人员而言，科研工作才是重要的；一个科普作家的的工作，在某种意义上，只是为了宣传别人。因而，与其投入精力去做什么科普工作，还不如实实在在地发表几篇论文呢！那样的话，一来有利于评各种头衔称谓，二来不会自降身价。正是这样的一些思维导致了有能力写



科普的科研人员不愿意从事这样一件有意义的工作。另外，科普工作的不足归根结底是我们国家对科研，特别是基础科研领域的重视不够。总是认为科学之所以存在，是要带来现实的生产力的。因而人们相对来说，更加关心技术，而不是基础的科研领域。而对科研人员的培养，也带有很强的功利性，以发表论文的数量等决定科研人员的职称之类的利益，因此导致了科研人员的急功近利。

那么我们需不需要重视科普工作呢？更进一步说，我们应不应当重视基础科学呢？

答案是显然的。当今世界任何一个真正的经济强国，一定是一个技术强国，而一个技术强国一定是一个基础科学强国。以高能物理的大型实验室或加速器为例，美国有 Tavatron、SLAC，欧洲有 LHC，日本有 KEK。而这些还不是美国、欧洲、日本所拥有的全部。我们国家则没有这样的大型加速器和实验室（北京的正负电子对撞机能量要低得多，相应的重要性更是不可同日而语）。技术并不是凭空生长的，它们一定要生长在基础科学肥沃的土壤上。我们国家基础科学的不足，导致了我国技术的不足；而科普工作的空白又导致了全民科学意识淡薄、在技术上的追求不足、发展潜力不足。我想，说中国是世界上第一的自行车大国，大概大部分国人都会认同。但是我们是不是一个自行车技术大国呢？我是说，那些能用于参加环法大赛或者山地越野赛之类的自行车中，哪个品牌是属于中国的呢？一个都没有！多么令人惊讶的事实呀！有一次，一个喜欢山地自行车越野的同学告诉我：“对于山地车，我们真的想买国货，但我们真的没办法买国货呀！”这样的话带给我的感

受是震撼的。

读者朋友们，我们真的需要提高全民科学素质，只有全民的科学素质提高了，我们才可以更好地发展技术与经济。从更深层次的意义讲，人类对于科学的追求，也并不仅仅是为了满足经济的需求，更是为了满足人类本身对未知的好奇心，正是知识与理性使人类成为了人类。而所有这一切的基础，就是要有一种对科学的热爱与向往，科普工作的目标正在于此——激发人们对科学的了解与热爱。因此，我们很有必要重视科普工作、发展科普工作。

我们有幸看到，在出版了霍金著名的《时间简史》之后，湖南科学技术出版社一发而不可收，为我们引进了大量的国外优秀科普读物。此后，很多其他的出版单位也加入了这个行列，我们在图书馆中可以找到的科普读物正在增多。

但是，科普工作并不仅仅是将国外科普作家的作品翻译成汉语，更重要的是，要有我们的人参与到科普工作中来，用自己的语言、自己的俚语、自己的常识与文化传统来为大家解释科学，用更容易为国人所接受的方式将科学讲给大家听。我们需要自己的科普作家，在这方面我们还差得很远。近年来，我们欣喜地看到，已经有一些人愿意在这方面做一些工作，比如网上流传的《相对论通俗演义》、《弦论通俗演义》等。这样的一些读物所受到的欢迎使我们确信，如果有好的作品，国人是很感兴趣来了解科学的。但是，我们还需要更多有能力的专业人士，以更加专业的姿态投入到我们国家的科普工作中来，为我们带来更多更好的科普作品，将各个科研领域最前沿的知识以大家能理解的方式介绍给大家，使我们能够有机会与他们一



FIRST MOVER

## 第一推动

起分享他们对于科学的热情与感悟。这是一个长期的过程，需要各方面的努力，不仅要有出版社、要有有志于从事科普事业的有能力的专业人才的积极参与，更要得到全社会的重视与支持，甚至还要有对知识产权的保护与尊重。

总之，我们国家需要基础科学，需要全民科学素质的提高。要在全社会树立正确的科学意识、培养全民的科学素养，离不开科普工作者的努力。我们需要科普工作者，需要自己的科普作家，需要尽快摆脱科普工作严重落后的局面。希望未来也有一天，有外国的译者将我们的科普作家写成的科普读物介绍到国外去。

我们需要越来越多的人加入这一平凡而伟大的工作！

译 者

2007 年 10 月





第一推动 FIRST MOVER

## 看看大爆炸之外……

尽管人们已经差不多接受了宇宙起源于大爆炸这一思想，但是我们却没有一个合理的理论可以描述导致这一创造性大冲撞的力。现代科学一些最深刻的问题来自于科学家解释宇宙起源时所遇到的困难。大爆炸之前又有些什么？过去的几年里，宇宙学家们已经开始致力于发展新的、有时甚至难以想象的想法，并且他们已经发现了一些线索。

在本书中，斯蒂芬·韦伯详细地研究了最新理论的奥妙之处。在介绍了广义相对论与量子力学——20世纪物理学的两大基础——之后，韦伯解释了这两种理论根本上的矛盾之处。在接下来几章令人惊奇的内容之后，韦伯将我们引向了物理学家们为解决这一矛盾而提出的种种古怪诡异的见解——从难以置信的小粒子到大得足以盖住宇宙的膜，最后作者把我们带到了理解力的全新领域。

这些还处于研究中、奇怪又美妙的想法到了韦伯的手里，便变得既通俗易懂又迷人有趣。韦伯带给读者的并不仅仅是有关物理学家现在如何看待宇宙的内容，还有在新的宇宙图像慢慢浮现时科学家们所感受到的敬畏与激动之情。

上架建议：科普类

ISBN 978-7-5357-5111-9



9 787535 751119 >

定价：35.00 元